



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

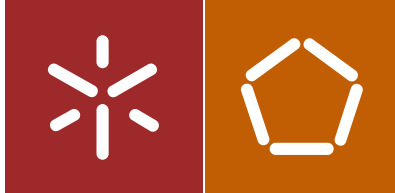
Carlos Miguel Alves Amorim de Barros

**Inspecção e diagnóstico das portas  
magistrais da Fortaleza de Almeida**

Carlos Miguel Alves Amorim de Barros  
**Inspecção e diagnóstico das portas  
magistrais da Fortaleza de Almeida**

U Minho | 2016

outubro de 2016



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Carlos Miguel Alves Amorim de Barros

**Inspeção e diagnóstico das portas  
magistrais da Fortaleza de Almeida**

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
**Professor Doutor José Luís F. da Silva Ramos**  
**Professor Doutor Paulo José B. Barbosa Lourenço**

Aos meus pais e irmã,  
que me tornaram no homem que sou hoje.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



## AGRADECIMENTOS

Embora a dissertação seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, existiram contributos de natureza diversa que deverão ser realçados. Esta secção permite-me demonstrar a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram, de uma maneira ou outra, para a realização deste trabalho. Queria em especial agradecer às seguintes pessoas:

- Ao Prof. Luís Ramos, que com o seu vasto conhecimento sobre o tema e seu apurado sentido crítico, foi uma peça fundamental no desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Prof. Paulo Lourenço, pela preciosa ajuda e pela frequente troca de ideias sobre as diversas temáticas deste trabalho;
- Ao Prof. Francisco Fernandes, pela colaboração na elaboração do levantamento georadar;
- Ao Prof. Carlos Alves, que com o seu vasto conhecimento sobre granito permitiu a execução da análise MEV-EDE;
- À Dra. Elsa Ribeiro, funcionaria no laboratório do AvePark do Grupo de investigação 3B's da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, pelo auxílio prestado para a elaboração da análise MEV-EDE;
- Ao Luís Javier da Universidade de Salamanca pela execução das imagens fotogramétricas e ainda pelo fornecimento das secções do levantamento laser.
- À Marieta Núñez e ao Carlos Barroso pelo auxílio prestado na execução de alguns ensaios não destrutivos in situ;
- Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente o Sr. Matos, o Sr. Marco e o Sr. Carlos pela ajuda na operação e/ou reparação dos vários equipamentos que foram utilizados;
- À câmara municipal de Almeida, pelas facilidades concedidas nos levantamentos dos edifícios, pela informação disponibilizada e ainda pela carinhosa estadia;
- Ao Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade do Minho, pela gentil cedência dos equipamentos para a realização de todos os ensaios experimentais;
- Aos meus pais e irmã que sempre me apoiaram e confiaram nas minhas capacidades. Todo este percurso graças a vocês;

- Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes quando precisei deles. De maneira a não criar injustiças não enunciarei nenhum nome, no entanto, os mais importantes saberão que lhes estou agradecido.

## RESUMO

Atualmente a sociedade dispõe de um vasto património construído e acumulado ao longo dos séculos, em que o estado de conservação e de segurança das construções antigas, principalmente as com reconhecimento de interesse histórico, é um assunto que vem motivando crescente preocupação, não só da sociedade em geral, mas também das instituições de algum modo ligadas à preservação do património histórico e cultural.

Esta dissertação tem como principal objeto a inspeção e diagnóstico estrutural das portas magistrais da Fortaleza de Almeida. Para tal, o presente trabalho requereu numa primeira fase a análise de todos os acontecimentos/intervenções realizados até à atualidade e ainda o levantamento de patologias existentes. Porém, devido à inexistente informação das propriedades dos materiais e constituição dos elementos estruturais houve necessidade de recorrer a campanhas de ensaios não destrutivos in situ e ainda a ensaios laboratoriais para complementar a informação e assim se poder retirar conclusões.

Perante as patologias identificadas, estudaram-se possíveis causas que contribuíram para o estado de degradação presente no granito constituinte das portas magistrais. O estudo realizado nas portas permitiu concluir que apesar do seu baixo estado de conservação, principalmente no granito, as estruturas das portas não aparentam atualmente nenhum risco para os seus utilizadores, uma vez que se tratam de construções bastante robustas, face a utilização atual. Por último, tendo em conta as causas de degradação, foram propostas algumas intervenções futuras de forma a garantir a conservação das portas magistrais da estrela do interior.

Palavras-chave: Conservação, Preservação, Inspeção, Diagnóstico, Fortaleza de Almeida, NDT.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **ABSTRACT**

Nowadays, the society has a vast built heritage, accumulated over the centuries, where the condition and safety of old buildings, especially with recognition of historical interest, it is an issue that has motivated increasing concern, not only of society in general, but also of the institutions in some way linked to the preservation of historical and cultural heritage.

This thesis main objective was the inspection and diagnosis of two Main Doors of Almeida Fortress (a set of buildings forming the entrance of the Fortress). For the execution of such study in the first phase the work required the analysis of all interventions occurred until the present time and also the survey of existing conditions. However due to missing information on the properties of the materials, in a second phase it was necessary to carry out in situ NDT testing campaigns and also the laboratory tests to better assess the deterioration processes present at the stone masonry structures.

With this study, the main pathologies were identified and studied. The study realized on the doors concluded that despite its low health condition, mainly the granite stones, the structures of the doors seems not have any risk for their users, since it is quite robust buildings in relation to the current use. Finally, with regards to the causes of degradation, several possible interventions have been proposed for future interventions so as to ensure the preservation of the inner door compounding star.

**Key-words:** Conservation, Preservation, Inspection, Diagnosis, Almeida Fortress, NDT.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>XIV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
<b>CAPÍTULO 2. A FORTALEZA DE ALMEIDA</b>	<b>7</b>
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. AS FORTIFICAÇÕES MEDIEVAIS, DE TRANSIÇÃO E MODERNAS	7
2.2.1. <i>Fortificação medieval</i>	7
2.2.2. <i>Fortificação de transição</i>	9
2.2.3. <i>Fortificação moderna</i>	11
2.3. BREVE HISTÓRIA DA FORTALEZA DE ALMEIDA	13
2.4. EDIFICADO CONSTITUINTE DA FORTALEZA DE ALMEIDA	15
2.4.1. <i>Principais elementos no interior da Fortaleza e apêndices defensivos</i>	16
2.4.2. <i>As portas de São Francisco ou da Cruz</i>	22
2.4.3. <i>As portas de Santo António</i>	25
2.5. HISTÓRICO DE INTERVENÇÕES REALIZADAS NA FORTALEZA	29
2.6. CONCLUSÕES	31
<b>CAPÍTULO 3. ALVENARIAS, PATOLOGIAS E TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO</b>	<b>33</b>
3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA	33
3.3. PATOLOGIAS DAS PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA	37
3.3.1. <i>Patologias ao nível estrutural</i>	37
3.3.2. <i>Patologias ao nível do material</i>	40
3.4. TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO	42
3.4.1. <i>Inspeção visual e levantamento fotográfico</i>	42
3.4.2. <i>Levantamento laser</i>	45
3.4.3. <i>Fotogrametria</i>	46

3.4.4. <i>Câmara boroscópica</i>	46
3.4.5. <i>Ensaios de ultrassons</i>	47
3.4.6. <i>Ensaios de sónicos</i>	47
3.4.7. <i>Georadar</i>	49
3.5. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO GRANITO.	50
3.6. CONCLUSÕES	52
<b>CAPÍTULO 4. LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO E DE ANOMALIAS</b>	<b>53</b>
4.1. INTRODUÇÃO	53
4.2. LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO	53
4.2.1. <i>Análise da informação existente</i>	53
4.2.2. <i>Levantamento da morfologia das paredes de alvenaria</i>	54
4.2.3. <i>Levantamento da morfologia dos arcos das portas magistrais</i>	58
4.2.4. <i>Levantamento Fotogramétrico</i>	61
4.3. LEVANTAMENTO DAS ANOMALIAS	61
4.3.1. <i>Porta exterior de São Francisco</i>	62
4.3.2. <i>Porta magistral de São Francisco</i>	69
4.3.3. <i>Porta magistral de Santo António</i>	79
4.4. RECOLHA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE LABORATORIAL	86
4.5. CONCLUSÕES	87
<b>CAPÍTULO 5. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS IN SITU</b>	<b>89</b>
5.1. INTRODUÇÃO	89
5.2. ENSAIOS SÓNICOS	89
5.2.1. <i>Ensaios sónicos diretos</i>	89
5.2.2. <i>Ensaios sónicos indiretos</i>	95
5.2.3. <i>Determinação do módulo de elasticidade</i>	100
5.3. ENSAIOS DE IMPACTO-ECO	103
5.3.1. <i>Ensaios impacto-eco na porta magistral de São Francisco</i>	104
5.3.2. <i>Ensaios impacto-eco na porta magistral de Santo António</i>	106
5.4. LEVANTAMENTO GEORADAR	110
5.4.1. <i>Levantamento da porta magistral de São Francisco</i>	110
5.4.2. <i>Levantamento da porta magistral de Santo António</i>	115
5.5. LEVANTAMENTO LASER	118
5.5.1. <i>Levantamento laser na porta magistral de São Francisco</i>	119
5.5.2. <i>Levantamento laser na porta magistral de Santo António</i>	121
5.6. CONCLUSÕES	123
<b>CAPÍTULO 6. ENSAIOS EM LABORATÓRIO</b>	<b>125</b>



6.1. INTRODUÇÃO	125
6.2. ENSAIOS A COMPRESSÃO DO GRANITO	125
6.3. ENSAIOS “DOUBLE PUNCH TEST”	131
6.4. ANÁLISE EXPEDITA AOS SULFATOS	136
6.5. ANÁLISE POR MEV-EDE	139
6.5.1. Local 14	139
6.5.2. Local 15	140
6.5.3. Local 17	142
6.5.4. Local 3	144
6.5.5. Local 4	145
6.5.6. Local 5	146
6.5.7. Local 10	147
6.5.8. Análise dos resultados	148
6.6. CONCLUSÕES	149
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E PROCEDIMENTO FUTUROS/INTERVENÇÕES NECESSÁRIAS</b>	<b>151</b>
7.1. CONCLUSÕES	151
7.2. PROCEDIMENTOS FUTUROS E INTERVENÇÕES NECESSÁRIAS	153
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>157</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>0</b>

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Resultados dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de São Francisco.....	93
Tabela 2- Resultados dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de Santo António.....	94
Tabela 3- Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em pedra do interior porta magistral de São Francisco.....	97
Tabela 4 - Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em alvenaria da porta magistral de São Francisco.....	97
Tabela 5- Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em pedra do interior da porta magistral de Santo António.....	99
Tabela 6- Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em alvenaria do interior da porta magistral de Santo António.....	99
Tabela 7- Resultados do módulo de elasticidade da pedra do interior da porta magistral de São Francisco.....	101
Tabela 8- Resultados do módulo de elasticidade da alvenaria do interior da porta magistral de São Francisco.....	102
Tabela 9- Resultados do módulo de elasticidade da pedra do interior da porta magistral de Santo António.....	102
Tabela 10- Resultados do módulo de elasticidade da alvenaria do interior da porta magistral de Santo António.....	103
Tabela 11- Valores dos picos das frequências e distância aos elementos.....	105
Tabela 12- Valores dos picos das frequências e distância aos elementos.....	108
Tabela 13- Calculo do material perdido ao longo do tempo na Zona A.....	120
Tabela 14- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona B.....	120
Tabela 15- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona C.....	120
Tabela 16- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona A.....	122
Tabela 17- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona B.....	122
Tabela 18- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona C.....	122
Tabela 19- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona D.....	122
Tabela 20- Calculo do material perdido ao longo do tempo na zona E.....	123
Tabela 21- Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra amarela testados com secagem a temperatura ambiente.....	128
Tabela 22- Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra branca testados com secagem em temperatura ambiente.....	129

Tabela 23- Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra amarela testados com secagem na estufa. ....	129
Tabela 24- Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra branca testados com secagem na estufa. ....	130
Tabela 25- Resistência à compressão de diferentes rochas. Fonte: (Barros, 2013).....	130
Tabela 26- Resultados dos ensaios na argamassa. ....	134
Tabela 27- Resultados dos ensaios com tiras colorimétricas para sulfatos.....	138

## Índice de Figuras

Figura 1- Imagens aéreas das fortalezas portuguesas abaluartas semelhantes pertencentes a raia luso-espanhola: a. Fortaleza de Almeida; b. Fortaleza de Valença; c. Fortaleza de Marvão; d. Fortaleza de Elvas; e. Fortaleza de Juromenha.....	2
Figura 2 – Implantação e distanciamento da fortaleza da Almeida e do Fuerte de la Concepción. Adaptada de: Google Maps 2013. ....	2
Figura 3- Castelo de Guimarães, castelo estilo Românico. Fonte: (Fontes, 2009).....	8
Figura 4- Torre de menagem encaixada no meio dos panos da muralha do Castelo de Celorico da Beira. Fonte: (Simões, 1999). ....	9
Figura 5- Estrutura genérica de uma fortificação de transição com a adaptação do tambor....	10
Figura 6- Castelo de Évora Monte. Fonte: (Pedro, 2012). ....	10
Figura 7- Planta esquemática da fortificação abaluartada com seus principais elementos arquitetónicos. Fonte: (Valadares, 2014). ....	11
Figura 8- Localização do concelho de Almeida. Fonte: (Campos, 2009).....	13
Figura 9- Fotografia aérea da Fortaleza de Almeida. Fonte: (Campos, 2009).....	14
Figura 10-Planta esquemática da fortaleza de Almeida com identificação dos principais elementos da uma fortificação abaluartada. Adaptada de: (Dennisbluie, 2014)... ..	16
Figura 11- Fosso das existentes ruínas do Castelo de Almeida. Fonte: (Falhas, 2009).....	17
Figura 12- Quartel das Esquadras. Fonte: (Lopes, Início Séc. XX). ....	18
Figura 13- Corpo de Guarda Principal. Fonte: (Aldeias Históricas de Portugal, 2012). ....	18
Figura 14- Picadeiro d'EL Rey. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal, 2012).....	19
Figura 15- Cobertura a prova de bomba das Casamatas. Fonte: (Fernandes R. , 2013).....	19
Figura 16- Torre do relógio. Fonte: (Fernandes R. , 2013).....	20
Figura 17- Praça Alta. Fonte: (Fernandes R. , 2013).....	20
Figura 18- Igreja Matriz de Almeida. Fonte: (Castela, 2007). ....	21
Figura 19- Revelim Doble. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal, 2012). ....	21
Figura 20- Fachada principal da porta exterior de São Francisco. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal, 2012). ....	22
Figura 21- Fachada principal da porta interior de São Francisco. Adaptada de: (Novos Horizontes, 2015).....	23
Figura 22 – Interior do túnel da porta interior de São Francisco, com possível ângulo de visionamento entre o interior e exterior. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal, 2012).....	24

Figura 23- Alçado principal das portas exteriores e Santo António. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal , 2012).....	25
Figura 24- Sistema duplo de cobertura .....	26
Figura 25- Alçado principal das portas interiores de Santo António.....	27
Figura 26- Túnel das portas interiores de Santo António. ....	28
Figura 27- Linha cronológica das principais intervenções realizadas na Fortaleza de Almeida. ....	30
Figura 28- Componentes da alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios. Fonte: (Binda, 1993). ....	34
Figura 29- Classificação das secções das paredes de alvenaria segundo o número de panos: (a) parede de pano simples; (b) parede de dois panos sem ligação; (c) parede de dois panos com ligação; (d) parede três panos ou dois panos com enchimento. Adaptado de: (Pagaimo, 2004).....	35
Figura 30- Tipo de aparelho em paredes de alvenarias: (a) juntas desalinhadas; (b) juntas irregulares alinhadas; (c) juntas regulares alinhadas. Fonte: (Pagaimo,2004).....	36
Figura 31- Tipo de assentamento em paredes de alvenaria: (a) horizontal; (b) horizontal e vertical; (c) aleatório; (d) escalonado com fiadas de regularização; (e) “espinhas de peixe”; (f) com calços e cunhas. Fonte: (Pagaimo,2004). ....	36
Figura 32- Mecanismos de rotura ao corte em paredes de alvenaria: (a) rotura por corte da argamassa nas juntas; (b) a parede funciona monoliticamente exibindo deformabilidade de corte até que os mecanismos internos de tração, associados ao funcionamento por resistência ao corte da parede, fadigam. ....	37
Figura 33- Instabilização local de uma parede de pedra com fraca ligação transversal entre paramentos. Fonte: (Giuffrè, 1993) .....	38
Figura 34- Rotação e esmagamento de uma parede de alvenaria. Adaptado de: (Roque, 2002) .....	38
Figura 35- Exemplos de configurações típicas em parede de alvenaria. a) fendilhação provocada por sobrecarga vertical; b) fendilhação provocada por flexão lateral da parede; c) fendilhação causada por atuação de cargas concentradas; d) fendilhação provocada por sobrecarga em parede com janela e porta. Adaptado de: (Pereira, 2009).....	39
Figura 36- Resumo dos principais agentes/mecanismos de deterioração da alvenaria e anomalias a eles associadas. Adaptado de : (Cóias, 2006) .....	40
Figura 37- Desagregação de granito. ....	41
Figura 38- Fissuração superficial no granito.....	41

Figura 39- Vegetação parasitária num muro de alvenaria.....	41
Figura 40- Eflorescências e cripto florescências no granito.....	41
Figura 41- Fungos e líquenes no granito.....	41
Figura 42- Manchas de humidade em parede de alvenaria. ....	41
Figura 43- Exemplo de meios auxiliares à avaliação in-situ. Fonte: (Flores-Colen, 2008). ....	44
Figura 44- Representação de instrumentos de referência para levantamentos fotográficos: a. Escala; b. Medidor de fissuras.....	45
Figura 45- Exemplo de aparelho laser scanning. Fonte: (Faro, 2015).....	45
Figura 46-Exemplo de câmara de fotogrametria terrestre.....	46
Figura 47- Exemplo de câmara boroscópica. ....	46
Figura 48- Exemplo de equipamento ultra-sons. Fonte: (Proceq, 2015) .....	47
Figura 49- Ensaio sónico pelo método de transmissão direta. ....	48
Figura 50- Ensaio sónico pelo método de transmissão semidirecto. ....	48
Figura 51- Ensaio sónico pelo método de transmissão indireta. ....	48
Figura 52- Exemplo equipamento georadar. Fonte: (Mala, 2015) .....	49
Figura 53- Exemplo de aparelho laser scanning. Fonte: (Faro, 2015).....	50
Figura 54- Ensaio para analisar as propriedades mecânicas mais recorrentes: a) Ensaio de compressão em granito; b) Ensaio ao corte em granito; c) Ensaio à flexão em granito; .....	50
Figura 55- Exemplo de caroteadora. Fonte: (Maquesonda, 2014) .....	51
Figura 56- Locais de análise das morfologias de parede de alvenaria analisados na porta magistral de São Francisco.....	54
Figura 57-Alçado de parede da parede da porta magistral de São Francisco no local A, com dimensões em metros.....	55
Figura 58- Alçado da parede da porta magistral de São Francisco no local B, com dimensões em metros. ....	55
Figura 59- Secção da parede da porta magistral de São Francisco no local C, com dimensões em metros. ....	56
Figura 60- Secção da parede da porta magistral de São Francisco no local D, com dimensões em metros. ....	57
Figura 61- Local de análise da secção de parede de alvenaria analisada na porta magistral de Santo António.....	57
Figura 62- Secção da parede da porta magistral de Santo António no local A, com dimensões em metros. ....	58

Figura 63- Perfuração realizada na cobertura da porta magistral de São Francisco: a) Início de furo; b) Final de furo.....	58
Figura 64- Localização em planta do furo executado na cobertura da porta magistral de São Francisco. ....	59
Figura 65- Constituição da secção obtida após a análise da perfuração na cobertura da porta magistral de São Francisco na zona da perfuração: A) Lajeado granítico de cobertura; B) Junta com cerca de 3cm de espessura; C) Camada de enchimento constituído por materiais britados e argamassas cimentícias; D) Arco estrutural.	59
Figura 66- Localização em planta dos locais de análise executados na cobertura da porta magistral de Santo António.....	60
Figura 67- Constituição da secção obtida após a análise do local 1 e 2 na cobertura da porta magistral de Santo António : A) Lajeado granítico de cobertura; B) Junta com cerca de 3cm de espessura; C) Camada de enchimento constituído por materiais britados, pedras de pequena dimensão e argamassas cimentícias; D) Arco estrutural. ....	61
Figura 68- Desgaste no granito do alçado principal: a) zona de entrada da porta; b) zona do brasão da porta.....	62
Figura 69- Locais com presença de líquenes: a) zona do arco principal de entrada; b) zona do muro de suporte da fachada.....	62
Figura 70- Destacamento de argamassa das juntas de alvenaria: a)zona junto á rotunda; b)zona junto á ponte . ....	63
Figura 71- Fenda no muro de suporte: a) zona da fenda; b) zona ampliada da fenda. ....	63
Figura 72- Deformações para fora do plano: a) deformação para fora do plano no muro e suporte; b) deformação para fora do plano na ponte de alvenaria.....	64
Figura 73- Locais com presença de manchas de humidade: a) local junto a entrada; b) local junto a saída.....	64
Figura 74- Local com destacamento de argamassa das juntas de alvenaria.....	65
Figura 75-Desgaste nas faces e zonas periféricas das pedras: a) teto do arco; b) parede junto a entrada.....	65
Figura 76- Local com a presença de musgo. ....	66
Figura 77- Possível fenda no arco da zona de transição a porta exterior de São Francisco.....	66
Figura 78- Movimento anormal nas pedras da zona superior do arco da casa das armas.....	67
Figura 79- Exemplo de escorrências de resinas e vegetação crescente no alçado traseiro da porta exterior de São Francisco: a) local com escorrência de resinas; b) local com vegetação crescente.....	67

Figura 80- Imperfeições no arco do alçado traseiro da porta de exterior de São Francisco: a) local das imperfeições no arco; b) ampliação do local das imperfeições do arco.	68
Figura 81- Assentamento das escadas de aceso a cobertura: a) zona do assentamento das escadas; b) ampliação da zona de assentamento das escadas.....	68
Figura 82- Locais com presença de líquenes: a) zona do muro da fachada; b) zona por cima do arco de entrada da porta. ....	69
Figura 83- Exemplos de locais com perda superficial de material no granito. ....	69
Figura 84- Deterioração da reconstrução de elementos decorativos da fachada principal da porta exterior de São Francisco: a) zona dos elementos decorativos reconstruídos com deterioração; b) ampliação da zona dos elementos decorativos reconstruídos com deterioração. ....	70
Figura 85- Deformações para fora do plano da fachada principal da porta magistral de São Francisco: a) zona do muro de suporte do lado direito junto ao fosso; b) zona do muro de suporte do lado direito junto ao fosso. ....	70
Figura 86- Deformações para fora do plano do muro da ponte da porta magistral de São Francisco. ....	71
Figura 87- Fissura devido a assentamento de muro do foso: a) local da fissura; b) ampliação do local de fissura. ....	71
Figura 88- Presença de atividade biológica (fungos e líquenes) no teto do túnel da porta magistral de São Francisco.....	72
Figura 89- Manchas de humidade nas paredes do túnel da porta magistral de São Francisco.	72
Figura 90- Florescências no túnel da porta magistral de São Francisco.....	73
Figura 91- Deterioração no granito da porta magistral de São Francisco: a) deterioração no pilastra esquerdo da entrada da porta; b) parede direita junto a entrada da porta.	73
Figura 92- Possível fenda no túnel da porta magistral de São Francisco: a) trajetória da fenda no lado direito de quem entra na porta; b) trajetória da fenda no lado esquerdo de quem entra na porta.....	74
Figura 93- Fendilharão pontual no granito.....	75
Figura 94- Deformações para fora do plano do muro no alçado traseiro: a) lado esquerdo de quem sai; b) lado direito de quem sai. ....	75
Figura 95- Presença de líquenes, musgo e vegetação na cobertura da porta magistral de São Francisco. ....	76
Figura 96- Cavidades no lajeado da cobertura, originados por antigos bombardeamentos.....	76
Figura 97- Rebaixe com morfologia anormal na extremidade da cobertura.....	77



Figura 98- Fotografias de intervenções na cobertura: a) escadas do lado esquerdo; b) escadas do lado direito. (Fonte: SIPA).....	77
Figura 99- Assentamento nas escadas de acesso a cobertura do lado direito de quem entra na porta. ....	78
Figura 100- Local dos assentamentos das escadas de acesso à cobertura do lado esquerdo de quem entra na porta.....	78
Figura 101- Fendas na cobertura da porta magistral de São Francisco. ....	78
Figura 102- Presença de fungos, líquenes e vegetação na fachada principal da porta magistral de Santo António. ....	79
Figura 103- Deterioração superficial do granito.....	79
Figura 104- Ausência de escoamento nos muros de segurança lateral da ponte de alvenaria: a) muro de proteção do lado esquerdo; b) muro de proteção do lado direito.....	80
Figura 105- Deformação no plano da fachada principal: local da deformação no plano; b) ampliação do local da deformação no plano. ....	80
Figura 106- Deformação no muro do fosso do lado esquerdo do alçado da porta magistral de Santo António.....	81
Figura 107- Eflorescências no túnel da porta magistral de Santo António.....	81
Figura 108- Presença de líquenes e musgo e ainda manchas de humidade no túnel da porta magistral de Santo António. ....	82
Figura 109- Deterioração da alvenaria de granito da porta: a) zona do teto do túnel; b) zona de uma parede. ....	82
Figura 110- Fenda numa cavidade decorativa da parede do lado esquerdo junto a entrada do túnel da porta magistral de Santo António.....	83
Figura 111- Possível fenda no teto túnel da porta magistral de Santo António. ....	83
Figura 112- Deslocamento das pedras na pilastra do lado esquerdo de quem entra na porta magistral de Santo António.....	84
Figura 113- Possível assentamento ao pilastra do lado direito junto a entrada da porta magistral de Santo António. ....	84
Figura 114- Fendas das padieiras e peitoris da janela do alçado traseiro da porta magistral de Santo António: a) janela com fendas; b) ampliação de uma zona com fendas na alvenaria da janela. ....	85
Figura 115- Presença de líquenes e musgo na cobertura da porta magistral de Santo António. ....	85
Figura 116- Levantamento de amostras na porta exterior de São Francisco. ....	86

Figura 117- Levantamento de amostras na porta magistral de São Francisco. ....	86
Figura 118- Levantamento de amostras na porta magistral de Santo António.....	87
Figura 119- Acelerómetro PCB 393b12 e respetivas especificações principais. Fonte: <a href="http://www.pcb.com/products.aspx?m=393B12">http://www.pcb.com/products.aspx?m=393B12</a> .....	90
Figura 120- Martelo instrumentado PCB 086D05 e respetivas especificações principais. Fonte: <a href="http://www.pcb.com/products.aspx?m=086D05">http://www.pcb.com/products.aspx?m=086D05</a> .....	90
Figura 121- Placa de aquisição NI USB-4431 da National Instruments e respetivas especificações de entrada e saída de sinal. Fonte: <a href="http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/206676">http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/206676</a> .....	90
Figura 122- Esquema de execução de um ensaio sónico direto. ....	91
Figura 123- Propagação das ondas P, S e R num meio solido. ....	91
Figura 124- Exemplo de gráfico recolhido num ensaio sónico direto de uma pedra através do <i>Sonic Analyser</i> . ....	92
Figura 125- Localização dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de São Francisco e respetivas distâncias consideradas no cálculo das velocidades. ....	93
Figura 126- Localização dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de Santo António e respetivas distâncias consideradas no cálculo das velocidades. ....	94
Figura 127- Execução de ensaio sónico indireto em parede de alvenaria.....	95
Figura 128- Exemplo de gráfico recolhido num ensaio sónico indireto de uma pedra através do <i>Sonic Analyser V5</i> .....	96
Figura 129- Localização dos ensaios sónicos indiretos na porta magistral de São Francisco. ....	97
Figura 130- Localização dos ensaios sónicos indiretos na porta magistral de Santo António. ....	98
Figura 131- Execução de medição entre o ponto de emissão e receção. ....	99
Figura 132- Exemplo de espectro de Fourier com a marcação de um dos picos. ....	104
Figura 135- Planta de localização dos ensaios impacto-eco das paredes do túnel principal da porta de São Francisco. ....	104
Figura 134- Representação dos picos obtidos em cada ensaio da porta magistral e São Francisco, com representação das distâncias (em metros) relativas ao primeiro e ultimo pico. .....	106
Figura 135- Planta de localização dos ensaios impacto-eco nas paredes do interior principal da porta de Santo António. ....	107
Figura 136- Representação dos picos obtidos em cada ensaio da porta magistral e São Francisco, com representação das distâncias (em metros) relativas ao primeiro e ultimo pico. .....	109

Figura 137- Planta de localização de radargramas a estudar na cobertura da porta.....	110
Figura 138- Radargrama 1.....	111
Figura 139- Radargrama 2.....	111
Figura 140- Radargrama 3.....	112
Figura 141- Radargrama 4.....	112
Figura 142- Planta de localização de radargramas estudados no interior da porta.....	113
Figura 143- Radargrama 5.....	113
Figura 144- Radargrama 6.....	114
Figura 145- Radargrama 7.....	114
Figura 146- Planta de localização de radargramas a estudar na cobertura da porta.....	115
Figura 147- Radargrama 1.....	115
Figura 148- Radargrama 2.....	116
Figura 149- Radargrama 3.....	116
Figura 150- Planta de localização de radargramas estudados no interior da porta.....	117
Figura 151- Radargrama 4.....	117
Figura 152- Radargrama 5.....	117
Figura 155- Radargrama 6.....	118
Figura 154- Exemplo de processo executado em todos os cortes transversais dos arcos selecionados. a) Nuvem de pontos original; b)Arco atual com limite do arco perfeito, bem como delimita de áreas. ....	119
Figura 155- Planta de localização dos cortes na porta magistral de São Francisco. ....	119
Figura 156- Planta de localização dos cortes na porta magistral de Santo António.....	121
Figura 157- Paralelepípedo de granito amarelo depois do esquadreamento.....	126
Figura 158- Medição (a) e pesagem (b) dos provetes.....	127
Figura 159- Equipamento utilizado nos ensaios de compressão (Pórtico de carga E4) .....	127
Figura 160- Proвете de granito antes do início de ensaio. ....	127
Figura 161- Exemplo determinação do módulo de elasticidade para um provete: a)Gráfico extensão-tensão do ensaio; b) Regressão linear da determinação do módulo de elasticidade. ....	128
Figura 162- Local de recolha da argamassa. ....	131
Figura 163- Provetes de argamassa utilizados nos ensaios. ....	132
Figura 164-a) Pórtico de carga do laboratório de materiais Uminho; b) Proвете de argamassa no início de ensaio; c)Proвете de argamassa no quase no final do ensaio. ....	132

Figura 165- Curvas tensão-extensão dos provetes recolhidas durante os ensaios “double punch test”.	133
Figura 166- Amostras de argamassa após os ensaios.	134
Figura 167- Gráfico de relação espessura do provete e tensão instalada.	135
Figura 168- Tiras colorimétricas de testes de sulfatos utilizadas.	136
Figura 169- Equipamento utilizado para a execução dos ensaios: a) Almofariz; b) Peneiro nº20; c) Balança; d) Proveta graduada e copo graduado plástico.	136
Figura 170- Esquema de cores dos 5 possíveis níveis, bem como a respetiva concentração de sulfatos.	137
Figura 171-Local 14	139
Figura 172- Provete de análise do local 14.	139
Figura 173- Imagem MEV e respetivo espectro retiradas da análise do provete do local 14.	140
Figura 174-Local 15	140
Figura 175- Provetes de análise do local 15: a) provete com partículas finas; b) provete de análise com placa de granito.	141
Figura 176- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) de partículas microgranulares muito ricas em Ca e com aluminossilicatos retiradas da análise do provete de partículas finas do local 15;	141
Figura 177- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) de material amorfo enriquecido em P, Cl e S, retiradas da análise do provete de partículas finas do local 15.	141
Figura 178- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) retiradas da análise do provete da placa de granito do local 15.	142
Figura 179-Local 17	142
Figura 180- Provete de análise do local 17.	142
Figura 181- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) de crostas de carbonato de cálcio retiradas da análise do provete do local 17.	143
Figura 182- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) da presença de silício e alumínio retiradas da análise do provete do local 17.	143
Figura 183- Local 3	144
Figura 184- Provete de análise do local 3.	144
Figura 185- Imagem MEV: (a) e respetivo espectro; (b) da presença de nitrato de potássio, retirada da análise do provete do local 3.	144

---

Figura 186- Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de carbonato de sódio, retirada da análise do provete do local 3.....	145
Figura 187- Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de sulfato de sódio e sulfato de potássio, retirada da análise do provete do local 3. ....	145
Figura 188- Local 4.....	145
Figura 189- Provete de análise do local 4. ....	145
Figura 190- Imagem MEV(a) e respectivo espectro(b) de cristais de sulfato de potássio, retirada da análise do provete do local 4. ....	146
Figura 191- Local 5.....	146
Figura 192- Provete de análise do local 5. ....	146
Figura 193- Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de sulfato de cálcio na análise do provete do local 5. ....	147
Figura 194- Local 10.....	147
Figura 195- Provete de análise do local 10. ....	147
Figura 196- Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de carbonato de sódio da análise do provete do local 10. ....	148

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## CAPÍTULO 1. Introdução

### 1.1. Motivação

Atualmente a sociedade dispõe de um vasto património construído e acumulado ao longo dos séculos, em que o estado de conservação e de segurança das construções antigas, principalmente as com reconhecimento de interesse histórico, é um assunto que vem motivando crescente preocupação, não só da sociedade em geral, mas também das instituições de algum modo ligadas à preservação do património histórico e cultural.

A inspeção constitui a primeira tarefa na avaliação da condição de uma estrutura, compreendendo, desde logo, a identificação e o registo das suas anomalias estruturais e não estruturais. A abordagem a utilizar durante o processo de inspeção deverá ser previamente selecionada em função do tipo de construção, do nível de detalhe da inspeção, da escala da intervenção e dos objetivos finais pretendidos. No caso particular das fortalezas e atendendo-se às heterogeneidades dos elementos estruturais, às deficiências das ligações e ao desconhecimento generalizado das técnicas de construção tradicionais, levam a que estes processos se revelem frequentemente inadequados, comprometendo, em consequência, a fiabilidade do diagnóstico e a eficiência de eventuais ações de reabilitação ou conservação (Ferreira & Vicente, 2013).

A Fortaleza de Almeida, obra fundamental do sistema abaluartado português, tem origens no Século XII e prolonga-se até ao Século XIX. Atualmente, a Fortaleza tem planta em forma de hexágono, quase regular, constituída por seis baluartes, formando uma estrela apenas perceptível com vista aérea, onde derivado à sua peculiar geometria, apresenta um dos maiores esforços construtivos das praças-fortes portuguesas. As suas muralhas possuem paramentos de cantaria, à exceção dos parapeitos, sendo circundadas por fossos e estradas cobertas, e os baluartes contornados por uma estrada de fuzilaria (Campos, 2009).

A Fortaleza (*Figura 1a.*) pode se dizer agrupada num conjunto de fortalezas portuguesas abaluartadas que pertencem a raia luso-espanhola com características bastantes semelhantes, quer arquitetónicas ou estruturais, sendo as fortalezas de Valença (*Figura 1b.*), do Marvão (*Figura 1c.*), de Elvas (*Figura 1d.*) e ainda a esquecida Fortaleza de Juromenha (*Figura 1e.*) as restantes obras abaluartadas que se associam a Almeida.



**Figura 1-** Imagens aéreas das fortalezas portuguesas abaluartadas semelhantes pertencentes a raia luso-espanhola: a. Fortaleza de Almeida; b. Fortaleza de Valença; c. Fortaleza de Marvão; d. Fortaleza de Elvas; e. Fortaleza de Juromenha.

Para além destas fortalezas abaluartadas portuguesas também podemos encontrar no resto do mundo fortalezas com origem Portuguesa, cuja ideia principal se mantém, mas devido a sua localização, há vários aspetos estruturais e arquitetónicos alterados, como é o caso da Fortaleza de Diu na Índia, a Fortaleza de São Sebastião em Moçambique, a Fortaleza de Mazagão em Marrocos e a Fortaleza de Ormuz no Irão. Importa também referir existência do Fuerte de la Concepción (**Figura 2**), pequena fortaleza abaluartada espanhola de traço italiano, implantada na província de Salamanca, a poucos metros da linha com Portugal e perto da Aldea del Obispo, a cerca de 9 km da Fortaleza de Almeida, destacando-se pela sua posição estratégica, que apesar de estar sobre um outeiro não demasiado alto, possibilita o controlo da zona Portuguesa do Vale da Mula.



**Figura 2** – Implantação e distanciamento da fortaleza da Almeida e do Fuerte de la Concepción. Adaptada de: Google Maps 2013.



Presentemente, Almeida não é uma estrela vazia, tem casas e alma, sofre com todo o planeta as transformações da economia e do ambiente, das energias e da globalização das ideias e do comércio, quer as suas portas estejam fechadas ou abertas.

Os edifícios históricos antigos que constituem esta obra, são bens de inestimável valor, uma vez que trazem consigo anos de história de civilização, visto isto o Homem tem o dever de preservar a sua génese e autenticidade, através de intervenções de conservação, para possibilitar assim a passagem do testemunho a gerações futuras. Porém a realização de qualquer tipo de intervenção obriga ao conhecimento das técnicas de construção e dos materiais o que no caso de Almeida é muito reduzido. A Fortaleza de Almeida, apesar de possuir bastante estudo do ponto de vista histórico e arquitetónico, possui escassez de estudos ao nível construtivo e estrutural. Tendo em conta esta ausência de investigação à necessidade de estudar as obras de Almeida a nível estrutural e construtivo, para assim garantir as condições de segurança aos utilizadores e assegurar que as intervenções realizadas a posterior sejam eficazes, ou seja, que desacelerem a deterioração existente nas construções.

## **1.2. Objetivos da dissertação**

Na presente dissertação tem como principal objetivo a realização de uma inspeção e diagnóstico estrutural nas duas portas magistrais da Fortaleza de Almeida, a porta de São Francisco e de Santo António, que atualmente apresentam anomalias recorrendo a campanhas de inspeção visual com o auxílio de métodos não destrutivos para avaliar a tipologia de danos (materiais e estruturais). Adicionalmente, trata-se do primeiro trabalho com carácter de inspeção estrutural com uma metodologia multifacetada, à luz dos modernos princípios de conservação do património (ICOMOS, 2004), realizada nas portas. Pretende-se também encontrar procedimentos de conservação/reabilitação necessários para a resolução de problemas encontrados durante o processo de inspeção, de forma a garantir uma maior duração da estrutura e uma maior segurança, quer para quem nela habita, quer para os visitantes da nítida estrela. Para tal será necessário alcançar os seguintes objetivos:

- Análise da informação existente sobre a Fortaleza sob o ponto de vista estrutural;
- Realização de campanhas de inspeção estrutural;
- Realização de ensaios não-destrutivos nas portas de São Francisco e Santo António;

- Diagnóstico estrutural sobre o estado de conservação e segurança das portas de Francisco e Santo António;
- Recomendações para a conservação/reabilitação das portas de São Francisco e Santo António da Fortaleza.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho é constituído por 7 capítulos, com o objetivo de expor de forma organizada as informações e resultados obtidos.

O primeiro capítulo está dividido em três subcapítulos. No primeiro é descrito, num pequeno texto, o enquadramento e importância do assunto tratado neste trabalho, no segundo é feita referência aos objetivos propostos e no terceiro subcapítulo está descrita a organização do texto.

No segundo capítulo é apresentado a Fortaleza de Almeida, onde estão explícitos conhecimentos sobre os tipos de fortificações existentes, história e edificado constituinte da Fortaleza de Almeida e ainda é apresentado um histórico de intervenções realizadas na fortaleza.

No terceiro capítulo é feita uma descrição dos tipos alvenarias que normalmente constituem estruturas semelhantes à da Fortaleza de Almeida e ainda as principais patologias existentes. Neste capítulo é ainda descrito algumas técnicas de inspeção e diagnóstico que poderão ser utilizadas na execução dos trabalhos.

No quarto capítulo é realizado o levantamento geométrico e de anomalias existentes nas portas principais da fortaleza, de forma a confirmar dados atuais e ainda analisar o estado de conservação atual.

O quinto capítulo descreve os ensaios não destrutivos utilizados para conhecer algumas características dos materiais constituintes das portas (ensaios sínicos), conhecer geometrias ocultas (levantamento geo-radar e ensaios de impacto-eco) e ainda a obtenção do desgaste do extradorso dos arcos das portas magistrais da fortaleza (levantamento laser).

No sexto capítulo é apresentado os ensaios em laboratório utilizados para a obtenção de algumas características mecânicas da pedra e da argamassa das portas magistrais. Nesta secção é ainda

realizada uma análise MEV-EDE e teste de sulfatos de amostras recolhidas nas portas magistrais, de forma a estimar os principais agentes de deterioração destas.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros e intervenções necessárias para consolidar as estruturas.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **CAPÍTULO 2. A Fortaleza de Almeida**

### **2.1. Introdução**

No presente capítulo apresenta-se um breve resumo das tipologias de fortalezas e sua evolução, nomeadamente os materiais que normalmente constituem este tipo de construções e as geometrias mas comuns dos elementos construtivos, e a história da Fortaleza de Almeida, as principais construções que a constituem e ainda apresenta-se, de uma forma mais detalhada, as portas de São Francisco e as portas do Santo António. Na parte final deste capítulo apresenta-se um historial de intervenções realizadas na fortaleza, dando peculiar interesse as intervenções nas portas.

### **2.2. As fortificações medievais, de transição e modernas**

As fortificações medievais e modernas implantam-se ao longo da costa marítima e nas zonas da fronteira portuguesa, mais precisamente em locais que, devido a condições geográficas favoráveis, como a orientação e a natureza do terreno, cursos de águas, ou outras, eram propícias à entrada de forças inimigas. As entradas utilizadas na invasão por via terrestre ao território nacional eram essencialmente cinco: pelo Minho, entre Valença e Monção; pela Veiga de Chaves; pelo Vale e Mondego, através de Almeida; pelo Vale do Tejo, através de Segura; e, por fim, pelo Alentejo, na linha de Badajoz-Elvas-Estremoz (Noé, 2014).

#### **2.2.1. Fortificação medieval**

A construção de castelos medievais está ligada ao desenvolvimento do processo de Reconquista e à consequente organização do território nacional. Estas obras nacionais apresentam características tão diferentes do resto da Europa que faz com que estas assumam um carácter, militar político e estratégico.

Os primeiros castelos medievais a surgir foram de estilo Românico, em meados do séc. IX a sul do Douro e na região de Entre-Douro-e-Minho (Noé, 2014), vindo mais tarde a sua construção a estender-se para outras regiões. O castelo Românico (*Figura 3*) caracteriza-se essencialmente por ser um castelo de “defesa passiva”, normalmente em alvenaria granítica, construído em locais elevados, de difícil acesso, nomeadamente sobre afloramentos rochosos, tirando partido

das condições naturais de defesa e da morfologia do terreno, dominando visualmente as áreas envolventes. Apresentam pequenas dimensões, com plantas normalmente irregulares, geralmente alongada ou circular. Este estilo de castelo é também composto por muralhas altas e apumadas, onde encostam torres de planta quadrangular, rasgadas por pequenas frestas.



**Figura 3-** Castelo de Guimarães, castelo estilo Românico. Fonte: (Fontes, 2009)

No ano 1249, após a tomada definitiva do Algarve, termina a Reconquista e com a definição da fronteira lusa castelhana muitos castelos do interior deixam de fazer falta para a zona de defesa fronteiriça, caindo em decadência e abandono. Procede-se, então, à reorganização administrativa do território, criando-se mecanismos de fiscalização e controlo mais severos e tentou-se reformar e modernizar as fortificações existentes. As intervenções nas fortificações incidem junto à fronteira terrestre com Castela, numa estratégia de estimular e consolidar o povoamento das zonas da raia luso-espanhola, onde concediam uma carta de privilégios a quem e mudasse para o interior de castelos e cercas. Os anos entre 1300 e 1448, correspondentes aos reinados de D. Fernando, D. João I, D. Duarte e Infante D. Pedro, não trouxeram grandes renovações ou inovações, como no século anterior, mas sim uma excelente consolidação dos elementos morfológicos característicos dos castelos góticos a nível nacional (Noé, 2014).

Os castelos góticos são livres dos condicionalismos topográficos e podem surgir em locais mais planos, possuem plantas regulares e de grande coerência geométrica. As muralhas são bastante largas e possuem uma cantaria maioritariamente quadrangular, permitindo o alargamento dos caminhos de ronda, facilitando a circulação de guarnições. Há um aumento significativo na precisão das armas de tiro, reduzindo a existências das abertas. A torre de menagem (**Figura 4**)

passa a integrar o circuito da muralha no meio dos panos ou num dos ângulos, dando uma maior robustez a fortificação ou defendendo as zonas mais sensíveis como é o caso das portas. As torres, apesar de o mais comum ser as de planta quadrangular, passam a existir noutras formas geométricas, como o caso das pentagonais, octogonais e heptagonais, permitindo uma defesa mais adequada e um melhor tiro flanqueado. Outra particularidade dos castelos góticos é a multiplicação das torres e cubelos, diminuindo o espaçamento entre eles, com menor altura que a torre de menagem e dispostas nos ângulos das muralhas.



Figura 4- Torre de menagem encaixada no meio dos panos da muralha do Castelo de Celorico da Beira. Fonte: (Simões, 1999).

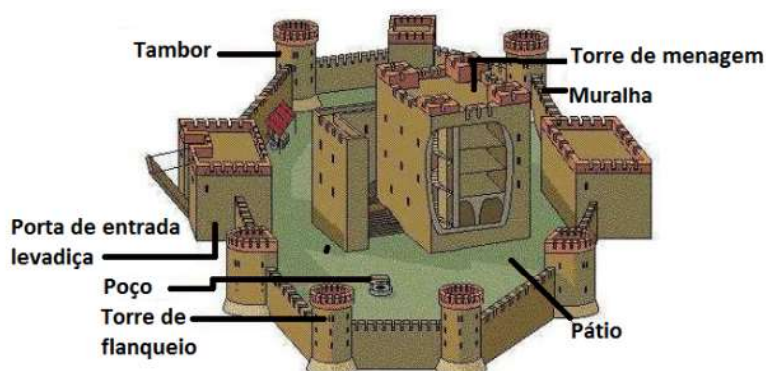
### 2.2.2. Fortificação de transição

A fortificação medieval, a partir de meados do século XV, torna-se ineficaz devido a utilização generalizada da pólvora nas armas de fogo e à utilização da artilharia pirobalística, uma vez que as torres passaram a ser alvos fáceis para o tiro. Este facto obrigou a passagem das fortificações por um processo de adaptação que conciliou as estruturas da fortificação medieval com outros mais vanguardistas e precursores da fortificação moderna abaluartada (Noé, 2014). O processo de adaptação pode dividir-se em duas fases: uma primeira, em que as estruturas recebem adaptações pontuais para a instalação de armas de fogo; e uma segunda, no reinado de D. Manuel I (1508-1510), em que se fizeram alterações mais profundas nas fortificações para alterar a sua estrutura arquitetónica, optando-se, em muitos casos, por erguer de raiz obras novas (Noé, 2014).

Relativamente à primeira fase de adaptação, as muralhas mantiveram a espessura, mas há uma diminuição da altura e reforço das bases, recorrendo-se a escarpas acentuadas e a ângulos dos muros mais agudos. Erguem-se as últimas torres de menagem medieval, como a do Castelo de

Alvito, Pinhel e Penamacor (Noé, 2014) . Ainda nesta fase são construídas para defesa do Porto de Lisboa outras obras de transição entre a arquitetura medieval e moderna.

Na segunda fase de adaptação surge o tambor (**Figura 5**), as torres circulares e ultra-semicirculares, de inspiração italiana, enterrada nos fossos que as cercavam.



**Figura 5-** Estrutura genérica de uma fortificação de transição com a adaptação do tambor.

Estas estruturas eram sem cobertura de maneira a evitar problemas de acumulação de fumos no momento do disparo e eram dotadas de molduras de tijolo em capialço ou de pedra, para aumentar o poder de absorção do impacto de projeteis. Ainda nesta última fase, aparecem os primeiros baluartes, embora bastantes atípicos em comparação com os baluartes que existem na atualidade. Esta fase encerra com a construção do castelo Évora Monte (**Figura 6**), entre 1531 e 1535, já fora do reinado de D. Manuel (Noé, 2014).



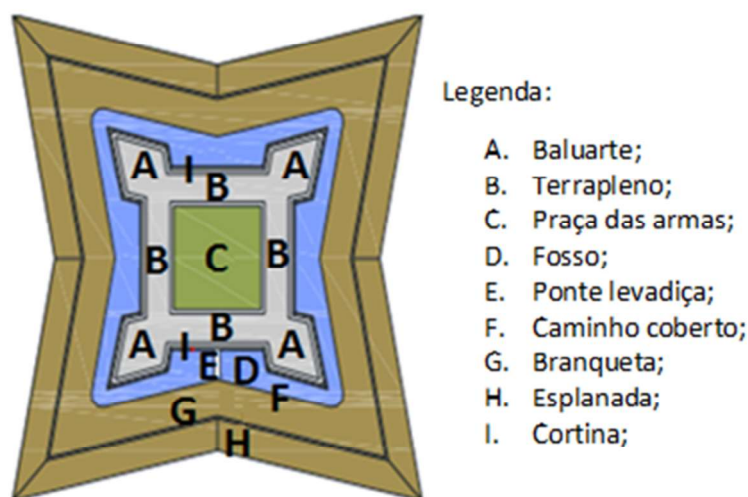
**Figura 6-** Castelo de Évora Monte. Fonte: (Pedro, 2012).



### 2.2.3. Fortificação moderna

A fortificação moderna aparece na primeira metade do século XVI, como resposta ao desenvolvimento e aperfeiçoamento do armamento pirobalístico e à mudança das formas de ataque, atingindo o seu apogeu em meados do século XVI (Noé, 2014).

Sendo imponentes fortalezas que envolvem vilas e cidades, as fortificações modernas, apresentam várias planimetrias, consoante o seu traçado, cortinas baixas, espessas e com a escarpa exterior em talude, por vezes com ressalto, rematada por cordão e parapeito. Nos ângulos flanqueados, sobre as portas ou outras zonas mais frágeis, dispõem-se guaritas de diferentes formas e coberturas (Noé, 2014). Em Portugal predomina o traçado abaluartado, cuja estrutura predominante é o baluarte, normalmente maciço, devido à existência de condicionantes geológicas no terreno de implantação, e de geometria pentagonal por ser a forma que melhor elimina os ângulos mortos de defesa e permite que todo o espaço exterior observado pudesse ser atingido pela artilharia da praça. Para além do baluarte, as fortificações modernas apresentam outras estruturas compondo o recinto principal, tais como o meio baluarte, a bateria e o redente, que se adaptam ao terreno articulando-se consoante a importância do local a defender. No exterior vários outros elementos são contruídos, como é o caso do fosso, o revelim, a tenalha, a contraguarda e ainda o caminho coberto (**Figura 7**). No **Quadro 1** apresenta-se uma descrição dos elementos constituintes das fortificações modernas.



**Figura 7-** Planta esquemática da fortificação abaluartada com seus principais elementos arquitetônicos. Fonte: (Valadares, 2014).

**Quadro 1** – Principais elementos construtivos utilizados em fortificações abaluartadas e sua definição. Adaptado de: (Noé, 2014).

<b>Termo</b>	<b>Definição</b>
<b>Baluarte</b>	Estrutura característica da arquitetura abaluartada, de planta pentagonal irregular, que se destacava nos ângulos salientes de duas cortinas contínuas ou de outros pontos vulneráveis. O baluarte é composto pelos flancos, onde a artilharia se concentrava, e pelas faces por onde eram conduzidos os ataques inimigos. Pode dispor de praças altas e praças baixas, de modo a criar plataformas de tiro a diferentes cotas, facto importante quando o terreno exterior apresentava variações topográficas que era necessário dominar.
<b>Bateria</b>	Plataforma, por vezes coberta, onde eram dispostas as bocas-de-fogo de artilharia. Podia ser abobadada, tipo casamata, descoberta, tipo barbeta, ou utilizar os baluartes e esplanadas das fortificações modernas.
<b>Casamata</b>	Espaço subterrâneo construído com abobada à prova de bala sob as cortinas e, menos comumente, sob os flancos dos baluartes, para alojar peças de artilharia.
<b>Contraescarpa</b>	Face exterior do fosso de uma fortificação, construída em declive, oposta à escarpa, que na fortificação abaluartada tem ao alto o caminho coberto.
<b>Cortina</b>	Troço do reparo de uma fortificação abaluartada que liga os baluartes entre si. Corresponde ao pano de muralha na fortificação medieval.
<b>Espigão</b>	Estrutura oblíqua e saliente, em forma de ponte, construída geralmente no ângulo de um baluarte, destinado a eliminar uma zona desprotegida de tiro.
<b>Esplanada</b>	Obra exterior em terra, modelada artificialmente, com declive suave e livre de obstáculos, para regularizar o terreno à volta de a fortificação, desde o parapeito do caminho coberto até ao campo exterior.
<b>Fosso</b>	Escavação feita à volta de uma fortificação, acompanhando todo seu perímetro ou limitando-se a determinada zona, considerada mais sensível ou menos protegida naturalmente, de modo a dificultar o acesso às entradas ou a aproximação às muralhas ou cortinas.
<b>Latrina</b>	Pequeno espaço coberto destinado a satisfazer as necessidades fisiológicas, construído inicialmente em madeira, destacado das cortinas e avançado sobre o fosso ou o mar, no trânsito ou nas casamatas, nesses dois últimos casos, localizando-se o mais próximo possível da escarpa, por causa dos esgotos, que eram conduzidos para o fosso.
<b>Paiol</b>	Edifício complementar ou espaço numa fortificação onde se armazenava a pólvora e outro tipo de munições, com sistema de ventilação por meio de condutas, normalmente em forma de cotovelo. Podia ser de construção temporária ou permanente e a sua localização poderia ser à superfície, semienterrado ou ser subterrâneo.
<b>Parapeito</b>	Muro que terminava os edifícios e estruturas de uma fortificação, para proteção dos seus defensores, nas da Época Moderna era disposto acima do reparo e com declive conveniente a ver-se a linha da contraescarpa.
<b>Plataforma</b>	Obra levantada sobre a cortina ou baluarte da fortificação, podendo constituir uma simples plataforma para tiros a barbeta ou de um cavaleiro sobre o baluarte.
<b>Porta Magistral</b>	Denominação da porta fortificada na fortificação moderna implantada no alinhamento do reparo da fortificação, sendo normalmente mais imponente que a porta do revelim.
<b>Poterna</b>	Porta da fortificação moderna de menores dimensões que a magistral ou a do revelim, com estrutura simples e dissimulada, conduzindo para o exterior e usada exclusivamente por militares para saídas rápidas e defesa das obras exteriores.
<b>Praça</b>	Espaço descoberto onde eram colocadas as bocas-de-fogo. Se as bocas de fogo forem colocadas sobre o baluarte, designa-se praça alta, caso esteja abaixo do plano do baluarte, designa-se praça baixa.
<b>Rastrilho</b>	Porta de ferro, de madeira ou de madeira reforçada com tirantes de ferro, terminada inferiormente em pontas, tipo grades, com movimento vertical, suspensa por cordas ou cadeias, pelas quais se podiam levantar ou baixar, abrindo ou fechando o trânsito sob o reparo, entre as portas exterior e interior.
<b>Revelim</b>	Estrutura exterior da fortificação moderna, de forma triangular, podendo, no entanto, ter flancos, construída entre dois baluartes e à frente da cortina para a reforçar e/ou cobrir as portas. O relevo do revelim é inferior ao do corpo da praça para não lhe cobrir as vistas e poder ser abatido pelo fogo da praça.

### 2.3. Breve história da Fortaleza de Almeida

A Fortaleza de Almeida localiza-se no concelho de Almeida (**Figura 8**), um dos 14 concelhos que compõem o distrito da Guarda, a uns 760 metros de altitude, na região centro dos pais, mais precisamente a sul de Figueira de Castelo Rodrigo, a norte do Sabugal, Este da Guarda e a oeste de Espanha. Encontra-se inserida na Raia portuguesa, numa paisagem planáltica sobre o bordo de um complexo xisto-migamatítico que se estende em direção do Côa (Andersen, 2009). Mais precisamente, a fortaleza situa-se na Vila de Almeida e está inserida numa paisagem essencialmente planáltica, rematada a poente pelo vale encaixado do rio Côa que atravessa o concelho correndo de sul para norte, onde são predominantes as formações graníticas de texturas variadas mas com grande uniformidade sob o ponto de vista da composição mineralógica (Andersen, 2009).



**Figura 8-** Localização do concelho de Almeida. Fonte: (Campos, 2009).

Almeida, apesar de afirmada na idade média pela sua irradiante cultura religiosa católica e também a militar, revela vestígios do período pré-histórico, quer na própria vila, quer por todo o concelho, em edifícios do tipo dolménico, castros (e.g. Castelo Mendo e Castelo Bom) e ainda em alguns objetos que têm sido encontrados nas margens do rio Côa. No que diz respeito à presença de romanos, também foram encontrados numerosos vestígios um local a cerca de 1 km da vila para norte, num sítio apelidado de “enchido de Sarça “, local onde a população romana se instalou inicialmente, tendo-se mudado após alguns séculos para junto do castelo no centro da vila de Almeida.

Deve-se destacar, também, a ocupação árabe que com o seu carácter explorador de riquezas tornaram as terras áridas circundantes da fortaleza um centro produtivo de agropecuária, onde mais tarde, em meados do século XI, os cristãos reconquistam o território e passou a ser uma zona castelhana. Em 1297, no reino de D. Dinis, após várias batalhas travadas celebrou-se o Tratado de Alcanices onde Almeida passa a pertencer ao território Português (Almeida, 2015).

A vila de Almeida (**Figura 9**), sinteticamente é rodeada pelas muralhas da Fortaleza, acompanhadas de fossos, originando um Hexágono com seis baluartes e seis cortinas com canhoneiras e revelins, designado por Fortaleza de Almeida (Rodrigues, 2009). A comunicação com o interior da praça-forte é estabelecida por varias portas, com especial destaque para as de Santo António e de São Francisco, que anteriormente eram ultrapassadas por pontes levadiças, atualmente convertidas em pontes de alvenaria.



**Figura 9-** Fotografia aérea da Fortaleza de Almeida. Fonte: (Campos, 2009).

A Fortaleza de Almeida, obra fulcral do sistema abaluartado português, possui a sua primeira planta conservada datada de 1736, todavia ao analisarmos a obra constata-se pormenores que nos elucidam a sua existência ser bem anterior a essa data. Exemplo destes podem ser verificados nas datas marcadas nas pedras de fecho do teto da porta interior de São Francisco, ou da Cruz, em que nos mostram que a construção foi realizada em duas fases, pois numa das pedras está bem marcado o ano de 1661, enquanto na outra pedra se verifica ser de 1748. Outro fator, que apoia a ideia da Fortaleza de Almeida ter sido construída antes da primeira planta existente, é os documentos escritos existentes por D. João IV em 1641, onde dá ordens a Charles Lassart para execução da obra (Campos, 2009).

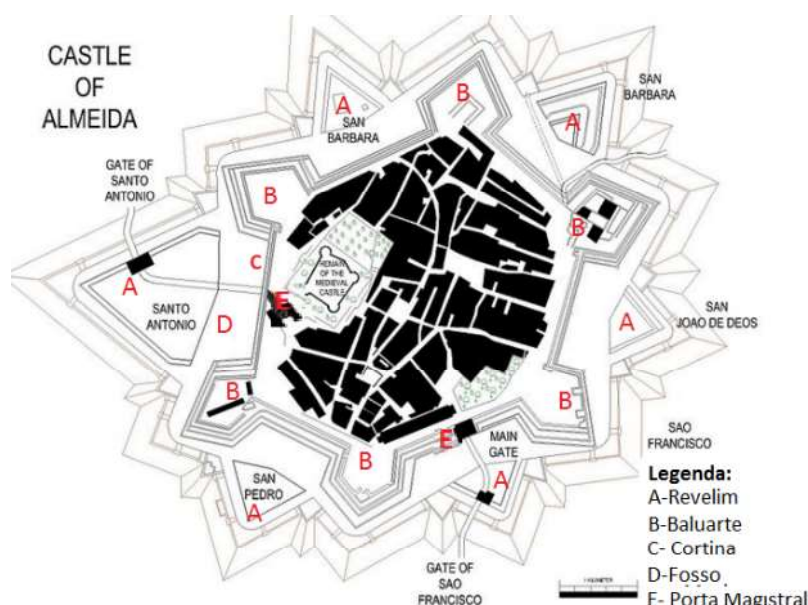
Segundo os estudos mais recentes dos Censos 2011, a vila de Almeida tinha 1321 residentes, dos quais 335 (inquérito local) viviam no interior da fortaleza, ocupando 149 edifícios habitacionais (Almeida, 2015) . Desde o estudo de 2011 a população residente tem vindo a diminuir ao longo dos anos, pois, tal como o país, a Fortaleza de Almeida sofre da crise económica, o que motiva a população mais jovem a sair de Almeida rumo a países que lhes concebiam melhor qualidade de vida.

## **2.4. Edificado Constituinte da Fortaleza de Almeida**

Ao longo de séculos, o interior e a própria Fortaleza de Almeida transformou-se inúmeras vezes até possui a tipologia atual, não só devido às inúmeras batalhas travadas, mas também consequência de alteração de tipo de uso do edificado quando era dominado por povos com ideias distintas dos anteriores. De notar que ainda hoje é possível verificar a destruição causada pela batalha durante a invasão francesa comandada pelo General Massena, em 27 de Agosto de 1810, nomeadamente as ruínas do Castelo, antigo paiol, pressupostamente à prova de bomba mas que acabou por explodir, deixando apenas as ruínas visíveis atualmente e ainda centenas de mortos, levando o exército a render-se (Rodrigues, 2009).

Na atualidade, de entre o inúmero edificado da fortaleza destacam-se vários elementos e interior da fortaleza e apêndices defensivos (*Figura 10*) e as portas de São Francisco e Santo António, alvo do presente estudo, que se passam a enumerar nas secções seguintes.





**Figura 10**-Planta esquemática da fortaleza de Almeida com identificação dos principais elementos da uma fortificação abaluartada. Adaptada de: (Dennisbluie, 2014).

### 2.4.1. Principais elementos no interior da Fortaleza e apêndices defensivos

#### A fortificação abaluartada e seus elementos constituintes

A fortificação abaluartada é um exemplar bélico de arquitetura militar seiscentista e setecentista. Possui um desenho de traçado da responsabilidade do engenheiro Pedro Gilles de Saint-Paul e representa uma das últimas tendências de arquitetura militar francesa (Noé, 2012). A planta é hexagonal irregular, constituída por seis baluartes irregulares e desiguais entre si, interligados por cortinas, protegidas por seis revelins (Cruz, Amores, Brecha, Santo António, Paiol e Doble). Em todo o seu perímetro está circundada por fossos de paramentos em talude, com escarpa exterior em cantaria.

Os seus seis baluartes, denominados por São Francisco, São Pedro, Santo António, Trem ou Nossa Senhora das Botas, Santa Bárbara e São João de Deus, são acedidos por rampas e possuem plataformas para lançamento de morteiros e de tiro a barbete. O baluarte de São Francisco é constituído por dezoito canhoes e por uma plataforma saliente externa para tiro de barbete e peças de calibre elevado. No seu subsolo pode-se ainda visualizar a existência de um paiol de bateria composto por dois espaços retangulares abobadados. O baluarte de Santo

António é constituído por dez canhoneiras e um paiol de bateria. O baluarte de São Pedro é constituído por dez canhoneiras e paiol de bateria cujo acesso é feito pelo exterior do muro de suporte de gola do baluarte, através de uma porta retilínea. O baluarte de Nossa Senhora das Botas, composto por treze canhoneiras, contém no seu interior o Picadeiro que ostenta as armas reais e frontão angular. O baluarte de Santa Bárbara, nome proveniente de vestígios de uma antiga capela existente, é formado por vinte e três canhoneiras e um paiol com três compartimentos. Por último o baluarte São João de Deus, obra constituída por vinte e oito canhoneiras no seu exterior e interiormente as casamatas, possui vinte salas retangulares subterrâneas com cobertura à prova de bomba.

O acesso ao interior da fortificação originalmente era realizado pelas portas de São Francisco e Santo António, tendo-se adicionado à pouco mais de vinte anos uma terceira entrada inscrita no pano da muralha. O facto das portas originais terem estrutura interna e externa, não se deve apenas ao sistema de abertura e fecho, pois o principal objetivo foi criar núcleos especiais de defesa.

### **As ruínas do Castelo de Almeida**

O Castelo de Almeida, construção inicial anterior a construção da Praça Forte em formato de estrela, tem origem árabe. Inicialmente existia um castelo quinhentista, com torre de menagem e uma muralha, onde mais tarde se reaproveitaram as fundações para erguer um castelo medieval no tempo de D. Dinis. A muralha do castelo tinha duas cinturas, sendo a interior em forma de trapézio retangular, com apenas uma porta para o exterior, que atravessada o fosso (Falhas, 2009).

O Castelo de Almeida (ou de D. Dinis) durante sua utilização sofreu muitas alterações, tomando várias formas, consequência de diversas invasões e do tipo de povoações residentes. As existentes ruínas do castelo, provenientes de uma explosão durante a terceira invasão francesa em 1810, facilitam a leitura da planta quadrangular irregular, cercada por um fosso lajeado (**Figura 11**) com contra escarpa



**Figura 11-** Fosso das existentes ruínas do Castelo de Almeida. Fonte: (Falhas, 2009).

revestida a cantaria, com fundações de quatro torres de planta circular em cada angulo, muito semelhante ao apresentado por Duarte Damas no séc. XVI (Campos, 2009).

### O Quartel das Esquadras

O quartel das esquadras (**Figura 12**), incluído na Zona Especial de Proteção das Muralhas da Praça de Almeida, foi mandado erguer pelo Conde de Lippe no séc. XVII e projetado por Manuel de Azevedo Fortes. Este imponente edifício do tipo militar possui dois pisos, planta retangular alongada, cobertura de quatro águas pontuada na cumeeira por sucessão ritmada de chaminés tronco-piramidais (Campos, 2009) .



**Figura 12-** Quartel das Esquadras. Fonte: (Lopes, Início Séc. XX).

Apesar de visualmente parecer um só volume, o quartel é constituído por dois volumes justapostos que definem alçados bastante compridos e ritmados. No seu interior podem-se conferir vinte e um módulos transversais, cada um dividido em dois espaços, que se destinavam a soldados de Infantaria (Campos, 2009) . O quartel, localizado na proximidade da Porta de São Francisco, possui características barrocas, de ótima execução e impacto visual de excelência.

### O Corpo da Guarda Principal

O Corpo da Guarda Principal (**Figura 13**) foi projetado em 1971, por Anastácio de Sousa e Miranda sob supervisão de Miguel Luís Jacob. Encontra-se implantado sobre o antigo local dos alpendres do mercado e destaca-se pela simplicidade do seu traçado ostentando uma fachada com um pórtico bélico de tripla arcada, sustentado por pilares bastante trabalhados e almofadados. Na zona central da fachada principal é notável a presença de um escudo bastante decorado, que embeleza um pouco a entrada do edificado (Campos, 2009).



**Figura 13-** Corpo de Guarda Principal. Fonte: (Aldeias Históricas de Portugal, 2012).



Atualmente, este corpo alberga as instalações da Câmara Municipal de Almeida em plena Praça da Liberdade e representa um dos Corpos de Guarda exigente mais emblemáticos de Portugal, tendo em conta a sua monumentalidade e traçado arquitetónico Neoclássico.

### O Picadeiro d'El Rey

O Picadeiro d'El Rey (**Figura 14**), localizado no Baluarte de Nossa Senhora das Brotas, ao longo da sua história sofreu inúmeras adaptações funcionais. Originalmente, durante o séc. XVII, funcionou como Trem de Artilharia onde existiram diversas forjas de manufatura e reparação do equipamento do equipamento de combate. Mais tarde, em meados do séc. XVIII, Miguel Luís Jacob decide adaptar o espaço para fábrica de pão, uma vez que o espaço já possui fornos e estava bem organizado (Campos, 2009).



**Figura 14-** Picadeiro d'EL Rey. Fonte: (Aldeias Hstóricas de Portugal, 2012).

No séc. XX, houve necessidade de restaurar o edifício, pois devido a bombardeamentos em meados do séc. XIX a obra caiu em ruína. Nesta adaptação do espaço a Picadeiro, conseguiu-se manter o portal coroadado com as armas reais, o edifício das manjedouras, o muro circular e as paredes laterais dos contrafortes. Desde então, o Picadeiro d'EL Rey é composto pelas Cavalariças com acomodações para 21 cavalos e outros espaços necessários para os visitantes desfrutarem das atividades equestres.

### As casamatas

As casamatas, localizadas no interior do Baluarte de S. João de Deus, são vinte galerias subterrâneas à prova de bomba (**Figura 15**), com uma largura e altura aproximadas de 4.5 metros e com comprimento variável máximo de 26 metros. Todas estas salas foram realizadas em alvenaria granítica da zona em abóbada de



**Figura 15-** Cobertura a prova de bomba das Casamatas. Fonte: (Fernandes R. , 2013).

volta perfeita e a sua maioria possui chaminé de ventilação própria. Relativamente a sua data de construção, distinguem-se duas fases, a primeira datada na mesma altura que a construção das Muralhas (séc. XVII) e uma segunda, que nunca chegou a ser concluída na totalidade, em 1797, data visível no frontispício da entrada (Campos, 2009).

O aglomerado de salas subterrâneo, em tempo de guerra servia de abrigo a população e ainda como armazém de mantimentos. Possuía sistema de abastecimento de águas autónomo, ainda hoje se pode verificar sua cisterna própria. Na atualidade, as casamatas albergam o núcleo central do Museu Histórico-Militar de Almeida.

### A torre do relógio

A torre do relógio (**Figura 16**), localiza-se na zona arqueológica do castelo, mais propriamente sobre o antigo espaço da Igreja Matriz da Nossa Senhora das Candeeiras, que desapareceu durante a explosão do castelo de Almeida em 1810. Construída em 1830, a torre possui planta quadrada com quatro aberturas sineiras acessíveis por escadas interiores de madeira e destaca-se na malha urbana dada a sua volumetria vertical (Fernandes R. , 2013).



**Figura 16-** Torre do relógio. Fonte: (Fernandes R. , 2013).

### A Praça Alta

Ponto mais alto da Muralha de Almeida e local de vigilância no passado, a Praça Alta (**Figura 17**) localiza-se no baluarte de Santa Barbara e oferece a todos os visitantes uma vista privilegiada sobre a vila. O baluarte de Santa Bárbara aponta para norte as suas 23 canhoes e sua plataforma permite que os canhões de calibre elevado disparem por cima do



**Figura 17-** Praça Alta. Fonte: (Fernandes R. , 2013).

parapeito em várias direções e a grande distância. Destacável também a existência do túmulo de Jonh Bereford, oficial Inglês que dirigiu o exército Português, tendo morrido em 1812 num cerco durante as campanhas napoleónicas (Fernandes R. , 2013).

### A Igreja Matriz

A Igreja Matriz (**Figura 18**), com início no séc. XVI, foi erguida sobre a área do anterior convento das Freiras Terceiras Regulares de São Francisco. Entre as suas imensas particularidades destaca-se o seu formato em forma de “U” desenvolvido em torno de um mosteiro quadrangular. No seu interior ainda se pode encontrar a Capela de Menino Jesus mandada construir em 1699 por Dantas da Cunha em 1699, que chegou intacta aos dias de hoje. Apesar de ser uma igreja, no decorrer dos séculos XVIII e XIX, este espaço assumiu as funções de quartel e hospital militar com vistas a auxiliar a defesa da estrela de pedra.



**Figura 18-** Igreja Matriz de Almeida. Fonte: (Castela, 2007).

Em 1810 com a explosão do paiol do castelo, a igreja sofre destruição e vista a sua necessidade de recuperação procede-se a remodelação da obra assumindo assim as características atuais (Fernandes R. , 2013)

### O Revelim Doble

O Revelim Doble (**Figura 19**), construído no séc. XVIII, apresenta estrutura dupla características a partir da qual lhe foi dado o nome. Do ponto de vista técnico é considerado perfeito, pois cobre à direita o baluarte S. João de Deus e à esquerda o baluarte de Sta. Bárbara. De influência Vaubaniana, o revelim apresenta no terrapleno uma construção abobadada que se pensa ter servido de paiol em tempos de carência de outras construções similares.



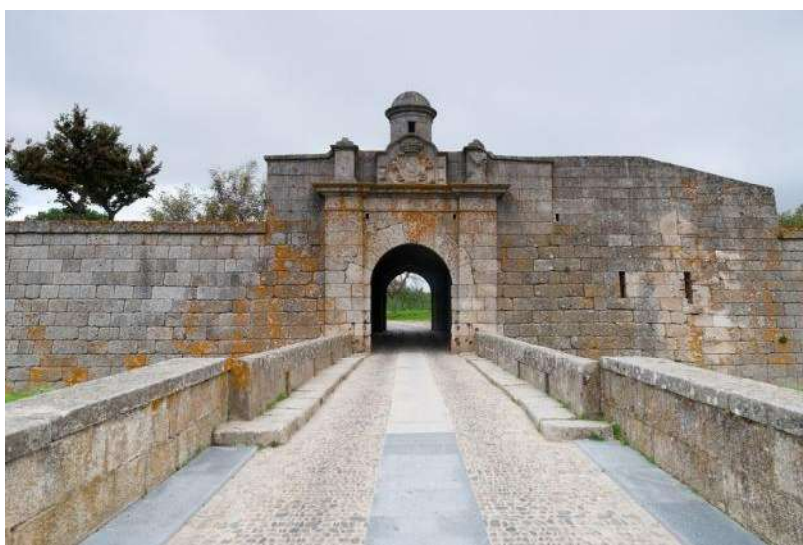
**Figura 19-** Revelim Doble. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal, 2012).

De destacar também a anterior existência de um hospital de sangue, criado em 1958 devido ao elevado numero de feridos que ocupavam a cadeia e a casa da câmara (Fernandes R. , 2013).

## 2.4.2. As portas de São Francisco ou da Cruz

### Porta exteriores

As portas exteriores e São Francisco (*Figura 20*), encontram-se incluídas na cintura exterior dos revelins de defesa da Fortaleza de Almeida e servem como principal entrada a quem chega à estrela. Apesar de a sua construção estar inscrita no séc. XVII, a porta apresenta características construtivas que certamente formas adicionadas ou corrigidas aquando a renovação da fortaleza após a devastação sofrida com a 3ª Invasão Napoleónica, em 1810.



**Figura 20-** Fachada principal da porta exterior de São Francisco. Fonte: (Aldeias Históricas de Portugal, 2012).

As portas apresentam uma técnica construtiva de dupla abobada protegida com cobertura anti bomba de lajeado assente com sistema geo-amortecedor. No seu interior existem dois compartimentos separados por uma passagem, denominado por corpo a guarda, não havendo assim compartimentação do lado oposto. O corpo da guarda em tempos remotos albergava uma sala de armas e uma sala de comando, no qual existia o oficial de dia ou de quarto a executar as funções defensivas (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007).

A ligação da porta à parte externa do fosso é possível atualmente através de uma ponte em alvenaria granítica, embora se duvide que este não seja o sistema original do conjunto da porta pois são visíveis orifícios na fachada pertencentes a sistemas de portas elevatórias.

A estrutura das portas assemelha-se bastante a uma casamata, uma vez que o volume de terras é encostado à construção dando-lhe a forma de uma cripta, permitindo o acesso rápido a cobertura de duas águas. Os seus muros de suporte de terras da fachada, de cantaria e com



cornija de forma arredondada dão um ar bélico a fachada principal extremamente decorada, encaixam numa ponte com entrada definida por dois pináculos decorativos, que atravessa o primeiro fosso (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007).

### **Portas interiores**

As portas interiores de São Francisco foi construídas entre 1661 e 1671, sob coordenação de uma equipa de técnicos franceses, da qual Pierre Garsin integrou e exerceu um papel fulcral e ainda sob a supervisão geral do arquiteto David Álvares.

O alçado principal da obra (

*Figura 21*), possui um frontão em arco abatido quebrado assente num conjunto de quatro pilares toscanos circundados por alvenaria do tipo almofadado, com forte decoração de perfurações cilíndricas nos silhares de granito (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007). No centro da fachada principal é notável um bélico brasão coroadado, acompanhado com miniaturas de bombas, barris de pólvora, estandartes e bocas de artilharia. A sua cobertura anti bomba constituída por dupla camada de alvenaria em forma de duas águas é de acesso rápido por via de escadas graníticas de maneira a permitir uma resposta defensiva rápida.

A travessia entre o fosso e as portas atualmente é realizada através de uma ponte em alvenaria, mas devido aos entalhes que a fachada principal das portas possui podemos concluir que em tempos remotos existia uma ponte levadiça de madeira.



**Figura 21-** Fachada principal da porta interior de São Francisco. Adaptada de: (Novos Horizontes, 2015).

No interior das portas desenvolve-se um túnel curvilíneo, quase desenhando um “s”, todo revestido a alvenaria granítica picada, dando uma certa robustez ao sistema global. Embora a sua planta se desenvolva em curva, existe um ângulo que permite o visionamento entre o exterior e interior (**Figura 22**), o que nos leva a pensar que existiu algum fator que levou a apressar a conclusão da obra, pois normalmente a principal ideia para o traçado retilíneo seria a total cobertura de visibilidade. Outro facto que nos leva a fundamentar esta ideia é a existência de compartimentos construídos apenas do lado esquerdo do alçado, não tirando assim benefício do outro alçado da obra, o que a diferencia das outras portas da fortaleza da mesma época. Relativamente ao compartimento esquerdo do alçado, instalado o Posto de Turismo desde 1998, em tempos remotos servia de Casa da Guarda para vigia permanente das entradas da fortaleza (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007). No Posto De Turismo ainda hoje é possível ver a robusta lareira, o quarto do oficial de turno e um pequeno compartimento que serviria como posto de detenção todos estes espaços devidamente ventilados por janelas ou frestas nos alçados.



**Figura 22** – Interior do túnel da porta interior de São Francisco, com possível ângulo de visionamento entre o interior e exterior. Fonte: (Aldeias Históricas de Portugal, 2012).

Esta porta foi vítima de grandes estragos causado pelas diversas guerras travadas, porém o cerco de 1810 foi o que lhe causou mais danos, levando a esta porta magistral estar fora de serviço durante um período larguíssimo de tempo.

### 2.4.3. As portas de Santo António

#### Porta exteriores

As portas de Santo António, contruídas entre 1661 e 1676, encontram-se implantadas no revelim de Santo António na zona mais escarpada da banda do Côa produzindo assim um efeito de defesa da entrada da Fortaleza (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007).

O alçado principal das portas exteriores de Santo António (**Figura 23**) é bastante simples tendo em referência as outras portas da fortaleza, pois pode se resumir à marcação de duas pilastras sem qualquer tipo de decoração abrigadas por uma cornija, do qual se realça na zona central um brasão.

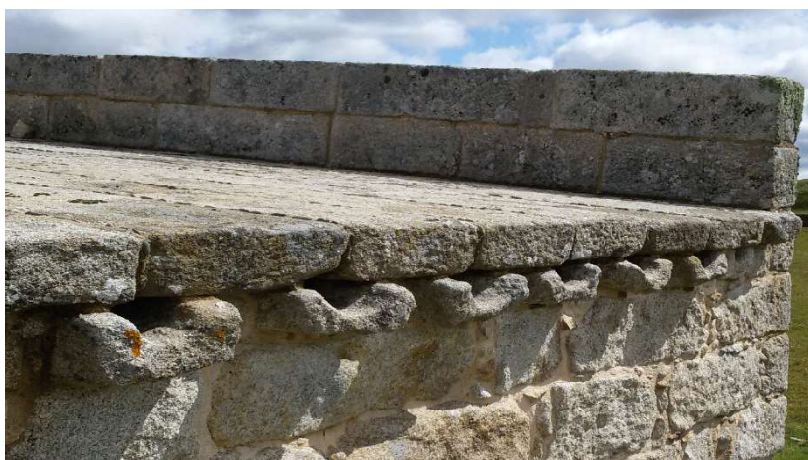


**Figura 23-** Alçado principal das portas exteriores e Santo António. Fonte: (Aldeias Historicas de Portugal , 2012)

O interior da porta possui traçado retilíneo com um rastrilho que subdivide um primeiro espaço defensivo do resto do túnel. Para além do túnel, existem ainda dois espaços abobadados inicialmente da mesma dimensão, porém por razão desconhecida a reabilitação de 2007, em que converteram os dois espaços num “Centro de Estudos De Arquitetura Militar”, optou por não restaurar a condição inicial (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007).

Nesta recuperação foi possível manter as funções sanitárias existentes no local e ainda a porta exterior de duas folhas de madeira. A porta cuja idade de madeira se aproxima a dois séc., possui ainda as ferragens e as folhas originais apesar de terem sido devidamente requalificadas.

Na cobertura é notável a excelência construtiva do sistema duplo de cobertura (**Figura 24**), constituído por um lajeado plano à prova de bomba, articulado com um engenhoso sistema de escoamento de águas pluviais garantindo assim a total estanquidade do edifício. Para além deste sistema pode destacar-se também o seu fácil acesso e proteção dada pelos muretes em caso de cerco o que permite uma eficaz defesa.



**Figura 24-** Sistema duplo de cobertura

### **Porta interiores**

As portas interiores ou magistrais de Santo António, datada do século XVII e projetada por Jerónimo Velho de Azevedo, é uma obra com características singulares que a retratam como uma das mais interessantes construções militares de Almeida. Localizadas no revelim de Santo António, mais precisamente na zona da cinta interna do fosso, as portas possuem uma configuração altimétrica exemplar, com uma curva apertada associada a uma inclinação acentuada no troço de trânsito junto à saída (Aldeias Históricas de Portugal, 2012). A inclinação acentuada era indispensável pois a implantação da obra deveria ocorrer numa cota altimétrica mínima quanto fosse possível, de maneira a que as portas não fossem descobertas do terreno da fortaleza (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007).

O seu alçado principal (**Figura 25**), apresenta semelhança com o das portas exteriores de São Francisco, relativamente a ideia dos pilastras salientes, porém na porta magistral a cantaria é bastante mais decorada. Resumidamente temos dois pilastras do portal, sequenciados desde a base até ao topo por várias cantarias da mesma geometria, finalizados ambos por pequenos



capitéis ornamentados em forma de cornija. Sobre estes capitéis assenta uma padieira protegida por uma corónide para onde concorre uma cobertura de duas águas de lajeado de pedra com um cilindro de vigia no cento, como era de esperar, visto que é um ponto geométrico de elevada altitude. No centro do portal contém o brasão bastante deteriorado apoiado sobre o arco um pouco abatido do portal.



**Figura 25-** Alçado principal das portas interiores de Santo António

Outro aspeto relevante na sua fachada principal é a variância de inclinação ao longo da altura do muro de suporte de terras de forma a dar uma maior estabilidade à estrutura, realçando assim a excelência de construção da época.

A sua cobertura de duas águas anti bomba é de rápido acesso uma vez que está quase nivelada com o restante terreno adjacente ficando assim de certa forma um pouco oculta do horizonte.

A travessia do fosso inicialmente era efetuada com recurso a pontes levadiças de madeira, porém após a invasão de 1810 as portas de São Francisco ficaram inoperacionais por um longo período de tempo e houve necessidade da exclusividade do uso das Portas de Santo António, obrigando assim em 1825 a conversão das pontes de madeira para pontes fixas em alvenaria.

No interior do portal, do lado esquerdo de quem entra encontramos a antiga sala da prisão agora convertida a um espaço com instalações sanitárias, com formato retangular e teto abobadado, onde ainda existe ainda a lareira original. No lado direito de quem entra existe a antiga casa do corpo da guarda adaptada recentemente a um espaço para convívios promovidos pelo município, que possui volumetria bastante superior ao compartimento do lado esquerdo, uma lareira original e ainda três pilares que promovem a desconfinança da existência remota de um segundo piso neste espaço. Notável ainda é a ventilação e os aquedutos sanitários que possuem cada um dos compartimentos interiores da obra, ainda visíveis atualmente.

A passagem de trânsito interior (**Figura 26**), toda ela curvilínea, ao vencer o desnível facilitou a criação de um pé direito invulgar possibilitando a existência de um piso de madeira estrutural estre a porta da face interna e o rastrilho, confirmado hoje em dia pela presença das suas escadas em granito, os seus quatro pilares e ainda os entalhes existentes nas paredes laterais do túnel (Campos, As portas e portenas da praça-forte, 2007). No túnel são visíveis os nichos deslumbrantes em forma de poterna abobadada ao longo das paredes, que serviam para expor pinturas em madeira da vida e obra do santo militar (Fernandes R. , 2013).



**Figura 26-** Túnel das portas interiores de Santo António.

## 2.5. Histórico de intervenções realizadas na Fortaleza

Nesta secção elaborou-se uma linha cronológica resumida (*Figura 27*) e ainda uma listagem (Anexo 1) mais detalhada das intervenções realizadas na Fortaleza de Almeida, baseada em todos os dados existentes no Sistema de Informação para o Património Arquitetónico da autoria de Paula Noé (2009) e ainda nas obras: “Almeida, Candidatura das Fortificações Abaluartadas da Raia Luso-Espanhola a Património Mundial-Unesco” e “Almeida, Portas e Poternas da Praça-Forte” ambas escritas por João Campos e editoradas pela Camara Municipal de Almeida.

Com base na análise da linha cronológica é possível identificar dois períodos de intervenções na Fortaleza, um primeiro entre os anos 1744 e 1825, e um segundo entre os anos 1938 e 2007. No período entre os anos 1744 e 1825, resumidamente demarca-se pela construção de elementos de apoio as construções existentes e reabilitação do edificado, supostamente danificado pela explosão de 1810. Relativamente ao segundo período, 1938 a 2007, distingue-se pela exaustiva reabilitação dos edifícios da fortaleza, maioritariamente executadas pela Direção Geral de Edifícios e Monumentos Nacionais, cujo objetivo principal era consolidar varias estruturas que se encontravam em perigo de ruína e ainda promover a vila de Almeida sob o ponto de vista histórico.

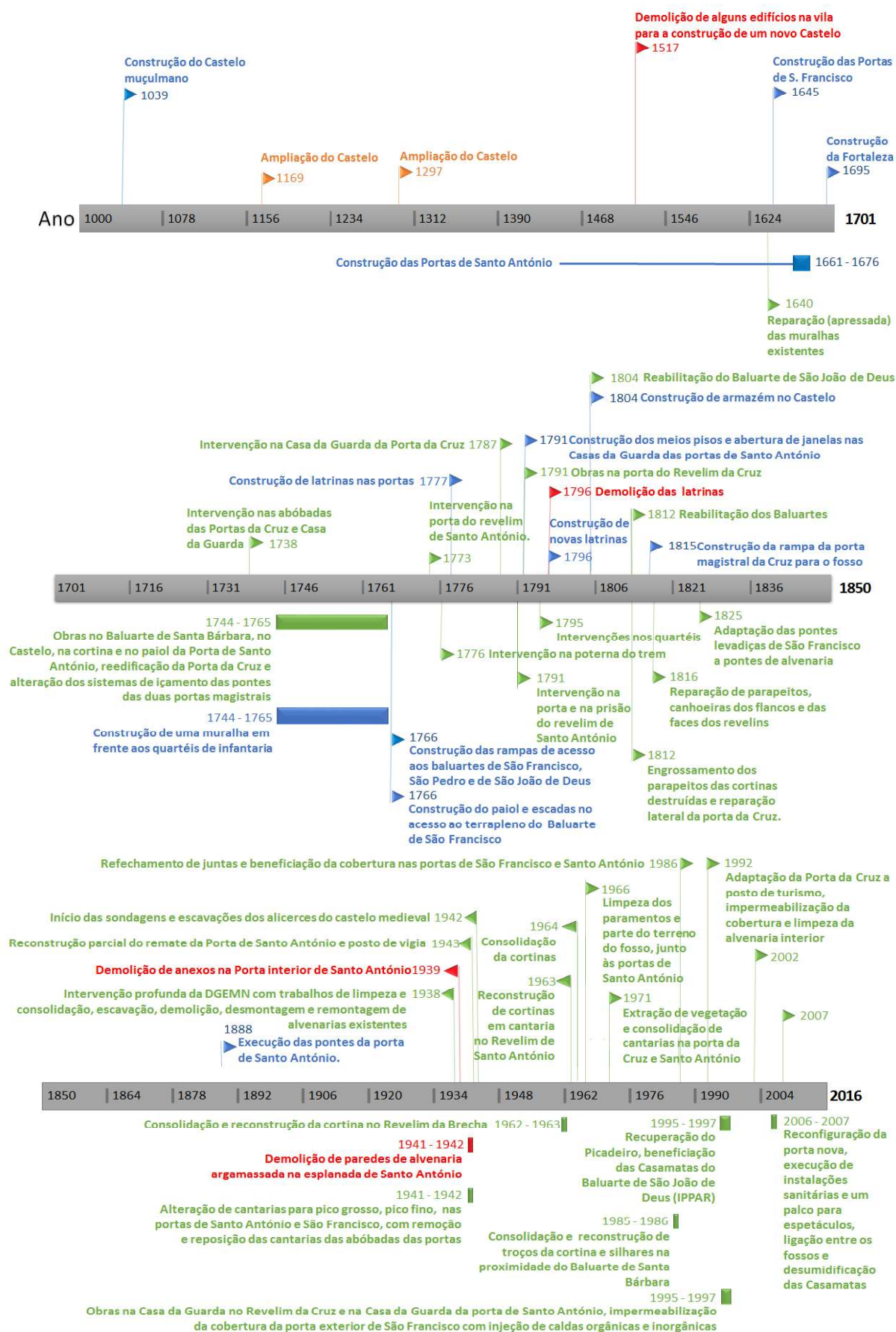


Figura 27- Linha cronológica das principais intervenções realizadas na Fortaleza de Almeida.

## **2.6. Conclusões**

Após a execução deste capítulo foi possível conhecer e distinguir os tipos de fortificações (medievais, de transição e modernas), constatando assim que a Fortaleza de Almeida atualmente é uma fortificação do tipo moderna. Com o estudo da sua história, apurou-se que ao longo do tempo a Fortaleza sofreu varias alterações devido a diversidade de povoação que nela habitou, à sua função e às numerosas batalhas travadas, sendo o principal marco o cerco a Almeida em Agosto de 1810, durante a terceira invasão Francesa.

A análise das construções constituintes da fortaleza permitiu conhecer a tipologia deste edificado, embora o mais explorado ter sido as duas portas principais, onde se denotou uma arquitetura e construção de excelência, conjugada com uma implantação estratégica inovadora face a época em que foram executadas.

A construção da linha cronológica das intervenções na Fortaleza de Almeida permitiu a identificação dos períodos de maior intensidade de reabilitação/construção e ainda o conhecimento dos materiais e tipologias construtivas utilizadas nas intervenções

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **CAPÍTULO 3. Alvenarias, Patologias e Técnicas de Inspeção e Diagnóstico**

### **3.1. Introdução**

No presente capítulo apresenta-se um breve resumo das patologias mais recorrentes em alvenaria de pedra, bem como as principais características e propriedades deste tipo de alvenaria. Numa última secção do capítulo apresenta-se as técnicas de inspeção e diagnóstico, onde se cita um pouco acerca de como fazer um bom levantamento visual/fotográfico e ainda os ensaios não destrutivos fulcrais para o estudo de obras em alvenaria de pedra.

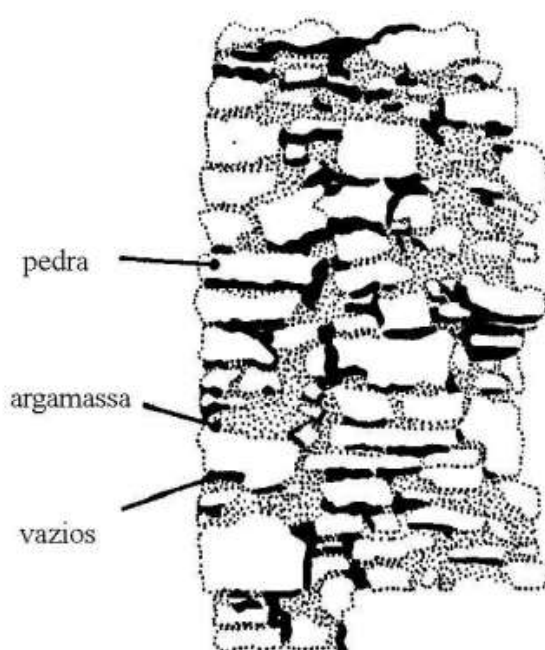
### **3.2. Paredes de alvenaria de pedra**

As estruturas antigas de alvenaria estão espalhadas por toda a Europa, em centros históricos e urbanos (e.g. igrejas e palácios), na arquitetura vernacular e na arquitetura militar, tais como fortalezas, castelos, arcos, muralhas, etc. O grandioso valor patrimonial, cultural e/ou arquitetónico das estruturas antigas de alvenaria fazem com que a sua conservação e reabilitação seja de grande interesse para quem os tutela.

Entende-se por “alvenaria” a associação de um conjunto de unidades de alvenaria (tijolos, blocos, pedras, etc.) e, geralmente, argamassa, que possui propriedades mecânicas intrínsecas capazes de constituir elementos estruturais. Em alvenarias antigas, os materiais utilizados para unidades de alvenaria eram, vulgarmente, a pedra ou o tijolo cerâmico, eventualmente reforçados com estrutura interna de madeira (Roque, 2002).

A argamassa, ou material ligante, entre as unidades depende do tipo de alvenaria, havendo alguns casos em que a alvenaria não possui ligante nas juntas, designadas por alvenarias de junta seca. Todavia, em alvenarias antigas, normalmente os ligantes são de natureza muito pobre (terra, argila ou argamassas de cal), desempenhando mais a função de preencher os espaços vazios entre as unidades de alvenaria, criando boas condições para o seu assentamento, do que propriamente para constituir “ligações químicas” com as unidades utilizadas. *“Numa boa parede de alvenaria, a argamassa desempenha um papel secundário comparativamente com as pedras, embora seja essencial para garantir uma boa compacidade ao conjunto”* (Carocci, 2001).

Dependendo da época, dos costumes e do local de construção, as alvenarias de pedra apresentam uma diversificada constituição interna. São caracterizadas por uma grande irregularidade geométrica e falta de homogeneidade material, resultado da diversidade de características (físicas, mecânicas e geométricas) dos materiais utilizados. Relativamente às pedras utilizadas, estas podem possuir diversa natureza (magmáticas, metamórficas ou sedimentares), forma (regulares e irregulares) e dimensão. As argamassas, em geral de fraca qualidade, raramente envolvem completamente as pedras, existindo a presença de cavidades ou vazios interiores, em maiores ou menores percentagens de vazios, consoante os casos (**Figura 28**).



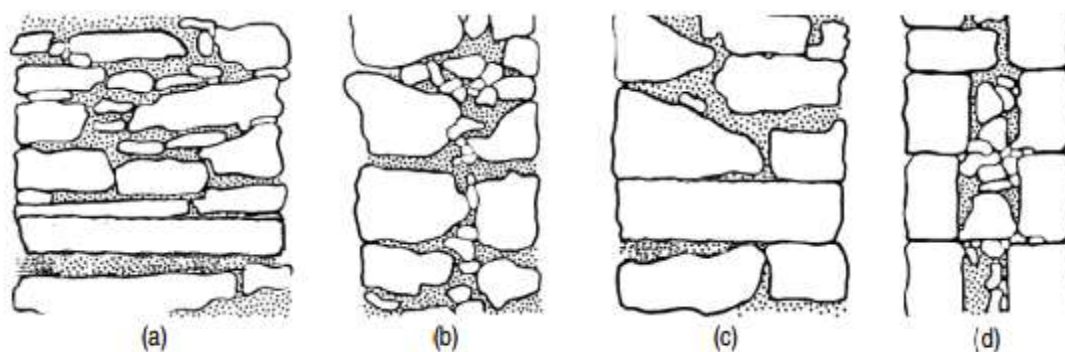
**Figura 28-** Componentes da alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios. Fonte: (Binda, 1993).

Porém apesar da diversidade de tipologia das paredes de alvenaria, segundo estudos relativos a edifícios históricos danificados pelos sismos realizados em Itália (Binda & Penazzi, 2000), definiram-se três tipos de paramentos:

- Paredes de pano simples (**Figura 29(a)**):
  - de pedra transversal única;
  - de pedra transversal única com rebocos espessos;
  - de grande espessura (normalmente com mais do que uma pedra transversal).
- Paredes de dois panos:



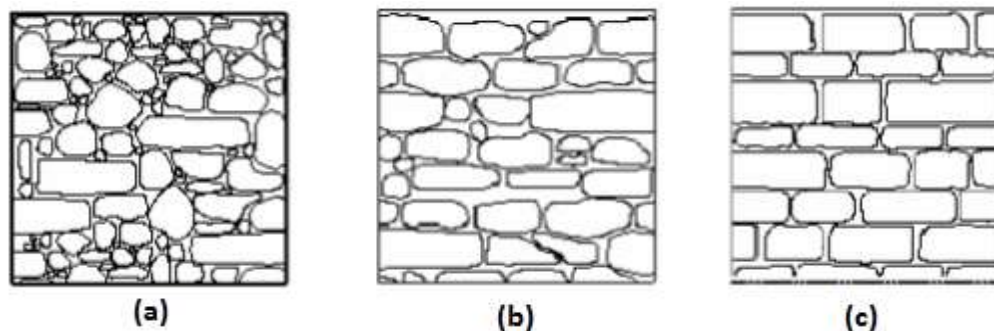
- sem ligação (**Figura 29(b)**)(paredes com dois paramentos completamente separados por uma junta vertical ao longo do interface de contacto, que pode ser seca ou com argamassa e cascalho);
- com ligação (**Figura 29(c)**): que pode ser feita por simples sobreposição (as pedras dos panos sobrepõem-se um pouco) ou por pedras transversais (usam-se perpianhos ou travadouros);
- Paredes de três panos ou dois panos com enchimento (**Figura 29(d)**): possuem uma secção resistente, heterogénea, com dois panos exteriores separados por uma camada interior, o núcleo (de pequena ou grande espessura), de fraca qualidade constituído por material de enchimento num conjunto de material mais grosseiro ou por material relativamente homogéneo, solto ou parcialmente ligado, com muitos vazios.



**Figura 29-** Classificação das secções das paredes de alvenaria segundo o número de panos: (a) parede de pano simples; (b) parede de dois panos sem ligação; (c) parede de dois panos com ligação; (d) parede três panos ou dois panos com enchimento. Adaptado de: (Pagaimo, 2004).

Relativamente ao tipo de acabamento ou aparelho (**Figura 30**), diretamente relacionado com o tipo de assentamento, pode ser classificado como:

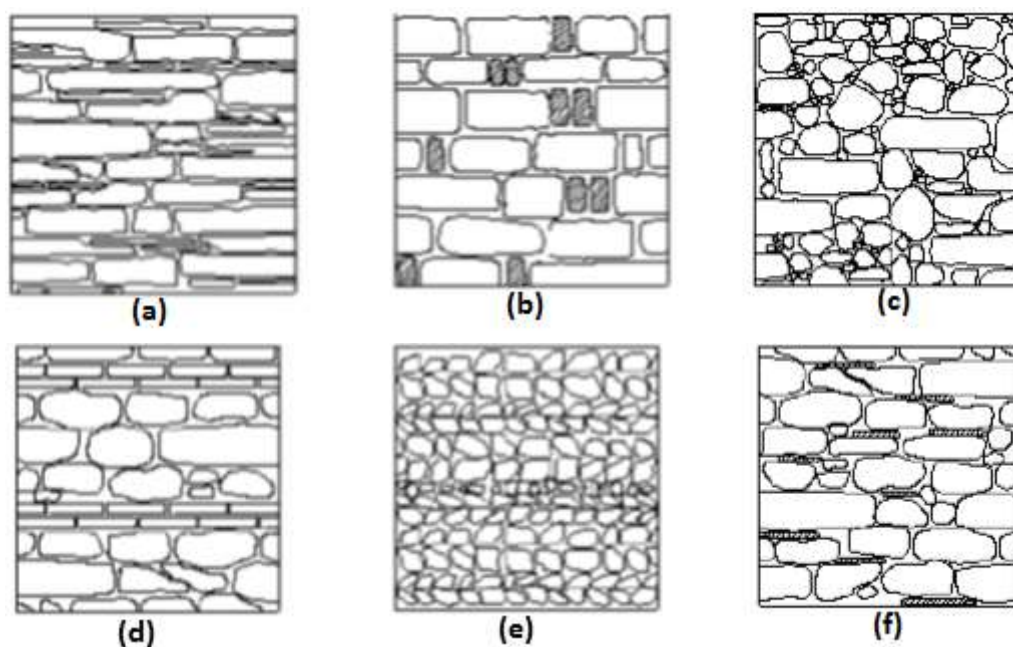
- Juntas desalinhadas;
- Juntas irregulares alinhadas;
- Juntas regulares alinhadas;



**Figura 30-** Tipo de aparelho em paredes de alvenarias: (a) juntas desalinhadas; (b) juntas irregulares alinhadas; (c) juntas regulares alinhadas. Fonte: (Pagaimo,2004).

Por fim, quanto ao seu tipo de assentamento, as paredes de alvenaria podem ser de assentamento:

- Horizontal;
- Horizontal / Vertical;
- Aleatório;
- Escalonado com fiadas de regularização;
- “Espinhas de peixe”;
- Com calços e cunhas.



**Figura 31-** Tipo de assentamento em paredes de alvenaria: (a) horizontal; (b) horizontal e vertical; (c) aleatório; (d) escalonado com fiadas de regularização; (e) “espinhas de peixe”; (f) com calços e cunhas. Fonte: (Pagaimo,2004).

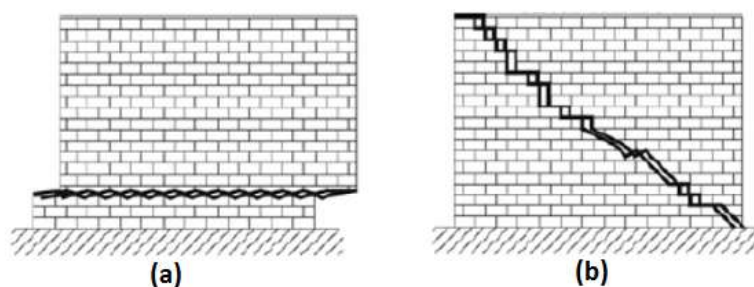
### 3.3. Patologias das Paredes de Alvenaria de Pedra

Ao identificar as patologias é necessário distinguir entre patologias inerentes ao comportamento estruturais e inerentes ao comportamento material (dependente das características dos materiais utilizados, das técnicas construtivas, da tipologia da secção, etc.). Normalmente é difícil a sua distinção pois manifestam-se como uma combinação destas vertentes o que torna a sua análise mais complexa.

#### 3.3.1. Patologias ao nível estrutural

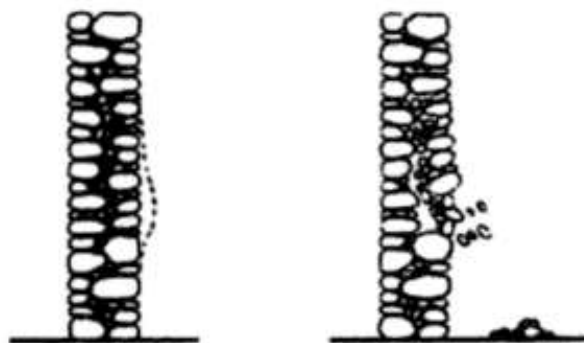
As patologias da alvenaria de pedra mais frequentes do ponto de vista estrutural, tais como as deformações, fendilhação e esmagamento, relacionam-se com:

- Fraca resistência a esforços de tração (argamassas quase sem coesão) e, consequentemente, fraca resistência a esforços de flexão;
- Resistência à compressão muito dependente, especialmente em paredes compostas, do grau de travamento transversal dos paramentos, da existência de material incoerente no núcleo e do volume e distribuição de vazios. Também a existência de “cavidades” na alvenaria está associada a um comportamento muito heterogêneo (Roque, 2002);
- Fraca resistência ao corte, condicionada quer pela débil resistência da argamassa a tensões de corte (lei de Coulomb), devido à fraca resistência a mecanismos de tração (tração diagonal) que se formam no comportamento global da parede, quando submetida a cargas horizontais no plano (*Figura 32a e Figura 32b*) (Roque, 2002).



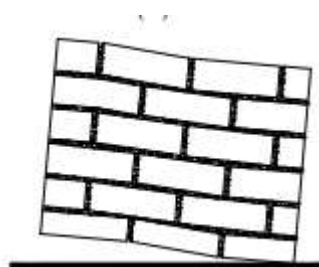
**Figura 32-** Mecanismos de rotura ao corte em paredes de alvenaria: (a) rotura por corte da argamassa nas juntas; (b) a parede funciona monoliticamente exibindo deformabilidade de corte até que os mecanismos internos de tração, associados ao funcionamento por resistência ao corte da parede, fadigam.

- Débil ligação transversal entre os paramentos constituintes da secção da parede, o que ajuda a criação de mecanismos de rotura por instabilização local (**Figura 33**), originando a desagregação do(s) paramento(s) . Este fenómeno pode ser causado por ação de cargas verticais ou ainda por ação de cargas horizontais, por vezes resultantes da ação sísmica ou de impulsos de arcos ou abóbadas (Roque, 2002) ;



**Figura 33-** Instabilização local de uma parede de pedra com fraca ligação transversal entre paramentos. Fonte: (Giuffrè, 1993)

- Fraca ductilidade e fraca capacidade de dissipação da energia absorvida, especialmente sob a ação sísmica, que se reflete em mecanismos de rotura frágil;
- Deficiente ligação entre paredes ortogonais, que inviabilizam, especialmente para a ação sísmica, um efetivo funcionamento da construção com comportamento tridimensional, tornando possível o derrube de uma fachada exterior, por rotação, após separação e deformação para fora do plano das paredes transversais (Roque, 2002);
- Fraca ligação entre os pavimentos/coberturas e as paredes resistentes que os suportam.
- Material pouco resistente na zona da fundação, provocando o esmagamento de material, criando rotação e deformações no plano do elemento (**Figura 34**).



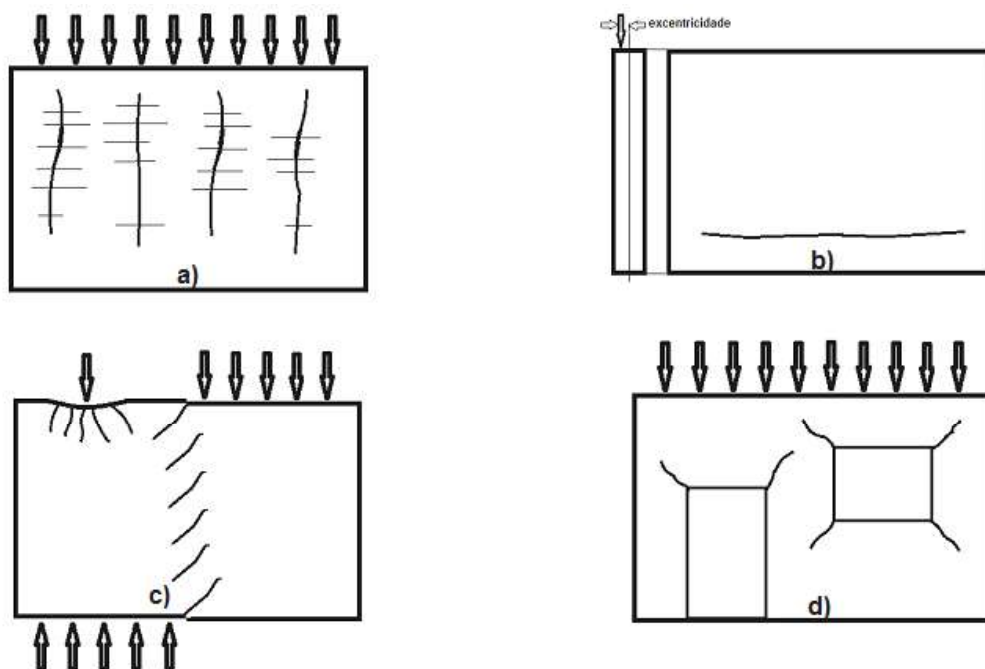
**Figura 34-** Rotação e esmagamento de uma parede de alvenaria. Adaptado de: (Roque, 2002)

Relativamente a fendilhação e a fissuração, patologias de especial interesse de diagnóstico nas alvenarias de pedra, por vezes ajudam a detetar outras anomalias interligadas com estas. A fissuração, aberturas de pequena dimensão (espessura  $<0,7\text{mm}$ ), estão normalmente associadas

a fenómenos de geologia dos materiais (expansões/retrações; ação térmica; ação de humidade). Por outro lado as fendas, espessura maior que 0.7mm, são regularmente associadas a deformações estruturais, que originam tensões de grandeza superior a resistência dos elementos (Ferreira R. , 2011). No **Quadro 2** é encontra-se a localização preferencial da Fendilhação e as suas possíveis causas associadas. Na **Figura 35** ilustra-se alguns exemplos de configurações típicas de fendas em parede de alvenaria.

**Quadro 2-** Localização preferencial da Fendilhação e suas causas em alvenarias antigas. Adaptado de: (Antunes, 2013)

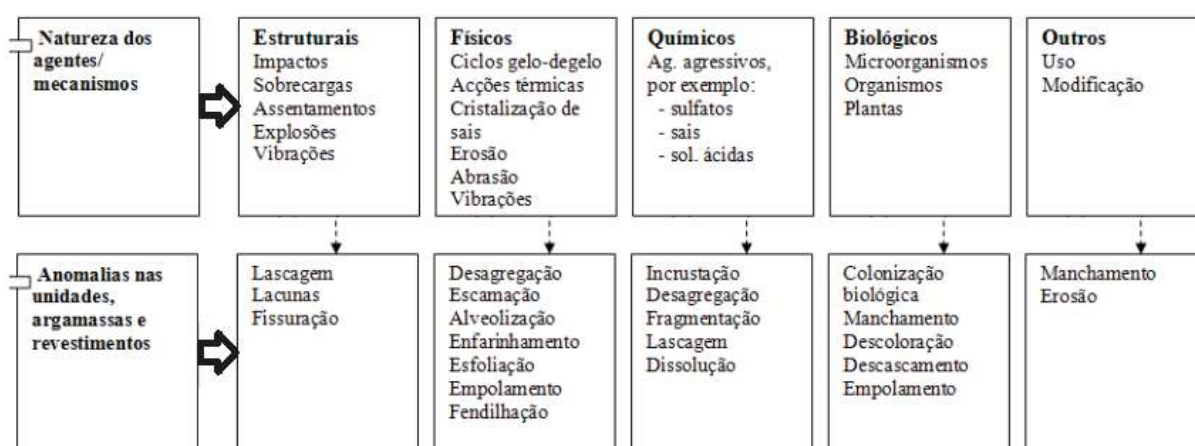
	Localização preferencial da anomalia	Causas
<b>Fendilhação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona corrente das paredes</li> <li>• Zonas onde se localizam aberturas das portas e janelas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentos de assentamento das fundações, particularmente assentamentos diferenciais.</li> <li>• Ação os sismos (esforços de corte)</li> <li>• Falta de resistência dos lintéis superiores ou de arcos de descarga pode conduzir a esforços de flexão excessivos e fissuras verticais.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coberturas em terraço, fendas horizontais na ligação da parede/cobertura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiente isolamento térmico, o que provoca variações dimensionais.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paredes de suporte das coberturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impulsos horizontais devidos aos abatimentos dos arcos, ou produzidos por disfuncionamentos estruturais de asnas de cobertura.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paredes resistentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erros de construção, principalmente nas paredes de pedra irregular, quando não são utilizados perpianos.</li> </ul>



**Figura 35-** Exemplos de configurações típicas em parede de alvenaria. a) fendilhação provocada por sobrecarga vertical; b) fendilhação provocada por flexão lateral da parede; c) fendilhação causada por atuação de cargas concentradas; d) fendilhação provocada por sobrecarga em parede com janela e porta. Adaptado de: (Pereira, 2009)

### 3.3.2. Patologias ao nível do material

Para além das patologias associadas ao funcionamento do elemento global da parede de alvenaria, é necessário também realizar a análise das patologias associadas ao material (pedra, argamassa de assentamento e revestimentos) constituinte do elemento. As patologias associadas ao material constituinte das paredes podem se diferenciar tendo em conta a sua causa ou agentes e deterioração. Estas causas estão associadas principalmente a processos físicos, químicos, biológicos entre outros. Na **Figura 36** representa-se esquematicamente as principais causas ou agentes de deterioração do material utilizado na construção em alvenaria, assim como as anomalias a eles associados.



**Figura 36-** Resumo dos principais agentes/mecanismos de deterioração da alvenaria e anomalias a eles associadas. Adaptado de : (Cóias, 2006)

As mais vulgares na alvenaria de pedra são a desagregação (**Figura 37**), fissuração superficial (**Figura 38**), vegetação parasitária (**Figura 39**), eflorescências e cripto florescências (**Figura 40**), fungos, líquenes (**Figura 41**), pátina biológica e ainda manchas de humidade (**Figura 42**) (Branco et al, 2005). Estas patologias não estruturais na maior parte dos casos é difícil obtenção obter a sua origem e por vezes devem se á junção de vários fatores o que obriga por vezes a utilização de métodos avançados.





**Figura 37-** Desagregação de granito.



**Figura 38-** Fissuração superficial no granito.



**Figura 39-** Vegetação parasitária num muro de alvenaria.



**Figura 40-** Eflorescências e cripto florescências no granito.



**Figura 41-** Fungos e líquenes no granito.



**Figura 42-** Manchas de humidade em parede de alvenaria.

### **3.4. Técnicas de inspeção e Diagnóstico**

Os ensaios não-destrutivos (END ou NDT), definem-se como qualquer tipo de ensaio praticado a um dado material ou estrutura a ser examinado sem qualquer ou apenas impercetíveis modificações nele. Este tipo de ensaios representam um conjunto amplo de técnicas úteis de análise, uma vez que permitem o controlo das propriedades dos materiais, com economia de tempo e dinheiro, e possibilitam a sua utilização numa diversidade de campos de aplicação.

Relativamente aos ensaios não-destrutivos aplicados na análise estrutural de monumentos e construções históricas, podem-se destacar como suas principais vantagens a identificação de danos, a determinação de dimensões ocultas, a deteção de variações no tipo e qualidade dos materiais, a identificação e monitorização de intervenções anteriores e ainda a deteção de estruturas ocultas inacessíveis (Ramos & Lourenço, 2014).

#### **3.4.1. Inspeção visual e levantamento fotográfico**

A inspeção visual é uma das mais antigas atividades nos setores industriais e é o primeiro ensaio não-destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, estando frequentemente associado a outros ensaios (Flores-Colen, 2008). Esta inspeção permite a identificação das principais características dos elementos de alvenaria, tais como defeitos, sinais de degradação ou dano, recorrendo-se normalmente a instrumentos tradicionais ou tecnologicamente mais avançados.

Ao longo da inspeção visual deverão ser identificados os possíveis fenómenos que estão na origem das anomalias para facilitar o posterior diagnóstico. Visto que há uma significativa diversidade de anomalias presentes na maioria do edificado recente, existem situações mais complexas que outras, sendo que nas anomalias mais simples, o diagnóstico é mais rápido e simples.

A inspeção visual é utilizada como meio para obter um pré-diagnóstico, logo é totalmente influenciada pela experiência, intuição e observação do investigador. O responsável pela inspeção visual deve ter em conta o edificado em conjunto, abrangendo todos os elementos construtivos que podem ser relevantes (*Quadro 3*), como por exemplo a sua implantação, a envolvente exterior, a estrutura ou até as suas instalações de águas e esgotos (Amaral, 2013).



**Quadro 3-** Representação dos elementos relevantes a inspecionar num edifício. Adaptado de: (Cóias, 2008).

Parte do elemento	Elementos relevantes a inspecionar
<b>Envolvente</b>	Terreno de fundação
	Acessos e tipos de arranjos exteriores
	Estacionamento, Garagem
	Infraestrutura local
<b>Estrutura</b>	Fundações e elementos estruturais
<b>Interiores</b>	Pavimentos e tetos
	Paredes interiores
<b>Envelope</b>	Coberturas
	Guarnecimentos dos vãos
	Paredes

Sendo a principal fonte de informação sensorial a visão, no caso do diagnóstico de materiais deve-se em caso de dúvida recorrer a outras impressões sensoriais, tais como o tato, olfato ou mesmo o paladar:

- **Avaliação táctil:** passar a mão na superfície molhada permite avaliar a existência de pulverulência ou desagregação;
- **Avaliação olfativa:** a humidade elevada pode ser detetada pelo olfato numa fase inicial;
- **Avaliação gustativa:** as eflorescências solúveis em água apresentam sabores diferentes permitindo, assim, a deteção de diferentes sais que originam as patologias.

Relativamente as ferramentas de apoio à inspeção visual (**Figura 43**) deve ser parte integrante de toda as visitas de inspeção o equipamento de proteção, constituído por capacete, luvas, botas e óculos de proteção. No levantamento de dimensões, podem ser utilizados a fita métrica e o distanciómetro laser para recolher ou verificar geometrias existentes. A limpeza dos elementos em estudo deve ser auxiliada sempre que necessário por escovas e pincéis macios de maneira a provocar uma alteração nula no elemento.



**Legenda:**

- 1- Distanciômetro a laser
- 2- Termo-higrômetro
- 3- Luvas descartáveis;
- 4- Martelo;
- 5- Espátula;
- 6- Chave de fendas;
- 7- Escova de limpeza;
- 8- Bússola;
- 9- Fita métrica (20m);
- 10- Fita métrica (comprimento máximo < 5m);
- 11- Nível de água;
- 12- Martelo de borracha;
- 13- Humidímetros;
- 14- Medidor de temperatura superficial;
- 15- Binóculos;

**Figura 43-** Exemplo de meios auxiliares à avaliação in-situ. Fonte: (Flores-Colen, 2008).

Na análise visual de elementos distanciados ou de dimensões reduzidas, os binóculos, a lupa e um espelho extensível auxiliam a observação do elemento. Deve-se efetuar, se possível, uma leitura da temperatura interior e exterior, e da humidade para verificar as condições climáticas a que o elemento em estudo se encontra exposto. Não menos importante é a utilização de um pequeno martelo, pois quando se ouve um som oco sobre o elemento de alvenaria, este indica a possibilidade de desagregação do elemento, a existência de vazios ou descontinuidades. Caso seja um som forte sucedido de eco confirma-se, normalmente, um bom estado de conservação.

O acesso ao elemento a inspecionar por vezes só é possível com recurso a escadas, andaimes, ou plataformas elevatórias. Relativamente à iluminação, mesmo no caso de existência de iluminação natural ou artificial suficiente, o inspetor deve fazer-se acompanhar de lanternas e/ou holofotes para obter um maior poder de iluminação.

Por último e não menos relevante, o levantamento fotográfico deverá ser intensivo, de maneira a registar todas as patologias existentes no interior e exterior do elemento a estudar. Para este levantamento deve-se utilizar um bloco de notas e uma planta para apontar os locais em que se fotografou a patologia. A câmara fotográfica a utilizar deverá ter características que possibilitem uma boa imagem e todos os levantamentos fotográficos devem ser acompanhados de escalas gráficas (**Figura 44a.**). No caso de fendas, devem-se utilizar medidores transparentes

de fissuras (**Figura 44b.**). Ao cumprir estes procedimentos o responsável pelo levantamento conseguirá posteriormente proceder a um completo mapeamento de patologias e relatório.



**Figura 44-** Representação de instrumentos de referência para levantamentos fotográficos: **a.** Escala; **b.** Medidor de fissuras

### 3.4.2. Levantamento laser

O levantamento laser (**Figura 45**) é uma tecnologia de medição e digitalização remota 3D de alta precisão, que permite executar levantamentos tridimensionais/bidimensionais com rápida obtenção do modelo e com erros reduzidos face as técnicas tradicionais de levantamento locais.



**Figura 45-** Exemplo de aparelho de levantamento laser. Fonte: (Faro,

O funcionamento desta tecnologia baseia-se na medição do percurso do impulso laser, entre a sua emissão e a deteção do retorno ou através de métodos de triangulação. Através desta medição obtém-se uma nuvem de pontos, que possibilita a criação de uma malha, renderizada à posteriori, com uma determinada textura ou fotografia (Júlio, 2011).

Esta tecnologia apesar de utilizar instrumentos não muito acessíveis, permite um vasto leque de aplicações, das quais se destacam o levantamento de arquitetura, de detalhes arquiteturais e de deformações.

### 3.4.3. Fotogrametria

A fotogrametria é um método de levantamento baseado na observação do mesmo objeto de dois ou três ângulos diferentes, possibilitando a reconstituição de uma imagem espacial a partir de imagens bidimensionais (OZ, 2012). Nesta técnica, a partir de pares de fotografias convergentes posicionadas no espaço através da tomada de pontos coordenados retiradas com recurso a câmara fotogramétrica (**Figura 46**), é possível a restituir



**Figura 46**-Exemplo de câmara de fotogrametria terrestre.

em “AutoCAD” desenhos e alçados das fachadas, para tratamento posterior. A referenciação exata das áreas fotografadas é conseguida através da determinação das coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de alguns pontos, por processos topográficos correntes.

Para proceder ao levantamento com recurso a esta técnica na fase de campo é necessário possuir uma câmara fotogramétrica, um medidor laser e por vezes uma estação topográfica. Relativamente a fase de tratamento de dados é necessária a utilização de um computador com capacidades gráficas para suportar os programas para o seu tratamento.

A utilização desta técnica permite levantamentos mais rápidos e grau de rigor mais adequado ao caso em estudo. Além destas vantagens, a fotogrametria permite realizar desenhos, a escalas variáveis consoante as necessidades, fornecer informações importantes de ordem histórica ou arqueológica, bem como referenciar as patologias apresentadas pelos elementos levantados (OZ, 2012).

### 3.4.4. Câmara boroscópica

A observação através de câmara boroscópica (**Figura 47**), consiste na utilização de um instrumento ótico que possibilita a observação do interior de elementos inacessíveis de uma forma pouco intrusiva. A técnica consiste na realização de furos em pontos de observação estratégicos, de maneira a ser possível a introdução do boroscópio para possibilitar o visionamento do interior do



**Figura 47**- Exemplo de câmara boroscópica.

elemento. O equipamento pode ser dotado de câmara fotográfica e/ou de filmar para se proceder ao registo de imagens do elemento observado.

### 3.4.5. Ensaios de ultrassons

O ensaio de ultrassons num dado objeto consiste na determinação da velocidade de propagação das ondas de um impulso ultrassónico, entre dois pontos escolhidos, de maneira a se obter informação sobre as características mecânicas, homogeneidade e presença de fissuras ou defeitos. Os ensaios ultrassónicos podem ser diretos, semidirectos ou indirectos (Progenie, 2015).

O equipamento (**Figura 48**) é composto por uma unidade central, onde se encontra o gerador de impulsos elétricos e o circuito de leitura, e por dois transdutores devidamente calibrados antes da execução do ensaio com auxílio a um invar.

De notar que este tipo de ensaio é realizado com base na transmissão de ondas ultrassónicas, logo a superfície deve estar o mais uniforme possível para garantir que os transdutores estejam em contacto direto com o máximo da sua superfície.



**Figura 48-** Exemplo de equipamento ultra-sons.  
Fonte: (Proceq, 2015)

### 3.4.6. Ensaios de sónicos

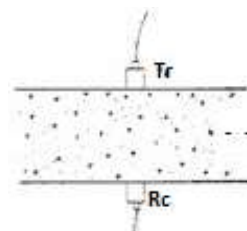
Num ensaio sónico é induzida uma onda através do impacto com um martelo instrumentado, e registada sua receção através de um acelerómetro. Com distância percorrida pela onda, retirada no local, e o tempo de viagem da onda, através da diferença entre o instante de impacto e o instante de receção, determina-se o valor da velocidade de propagação da onda sónica. A velocidade é influenciada pela composição da alvenaria assim como pela presença de heterogeneidades, vazios e áreas deterioradas.

Em estruturas de alvenaria, a utilização de ensaios sónicos tem como objetivo: caracterizar qualitativamente a alvenaria através da morfologia da secção da parede; detetar a presença de

vazios e defeitos; controlar a eficácia de reparações por injeção; detetar alterações nas características físicas do material (Binda et al., 2000).

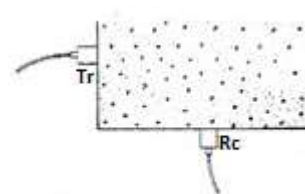
O ensaio sónico pode ser efetuado de diferentes formas, de acordo com os diferentes métodos de transmissão:

- Ensaio sónico pelo método de transmissão direta ou por transparência (**Figura 49**). Este método envolve fazer percorrer a onda de tensão através da espessura da parede de alvenaria. Os pontos de emissão e receção das ondas de tensão estão alinhados um com o outro, em lados opostos do elemento. A velocidade do pulso sónico detetada é então afetada pela qualidade e consistência da secção da parede de alvenaria.



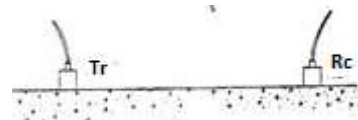
**Figura 49-** Ensaio sónico pelo método de transmissão direta.

- Ensaio sónico pelo método de transmissão semidirecto (**Figura 50**). Os ensaios semidirectos são ensaios em que os pontos de emissão e receção das ondas sónicas encontram-se em superfícies ortogonais entre si.



**Figura 50-** Ensaio sónico pelo método de transmissão semidirecto.

- Ensaio sónico pelo método de transmissão indireta (**Figura 51**). Os ensaios indirectos são ensaios nos quais ambos os pontos de emissão e receção das ondas sónicas estão posicionados na mesma face da parede de alvenaria.



**Figura 51-** Ensaio sónico pelo método de transmissão indireta.

As ondas de tensão registadas usando o método de transmissão indireta são aquelas que geralmente passam através da face da parede, assim a qualidade e a consistência da face da parede irá afetar os valores detetados da velocidade do pulso sónico. Para uma completa avaliação é necessário verificar a transmissão das ondas sónicas tanto na direção horizontal como na direção vertical (Guimarães, 2009).

A aplicação dos ensaios sónicos em alvenarias tem algumas limitações, que podem ser definidas como (Guimarães, 2009):

- Custo das operações devido ao grande número de leituras que deve ser feito, o que faz com que seja um processo bastante demorado;
- Dificuldade na interpretação e elaboração de resultados devido à não homogeneidade do material;
- Necessidade de calibrar os valores para os diferentes tipos de alvenaria.

O equipamento necessário para a execução de ensaios sónicos é um martelo instrumentado com sensor piezométrico, acelerómetro, uma caixa de canais e ainda um computador com o *software* recomendado. O martelo instrumentado gera a onda de tensão e regista a força de impulso. Os acelerómetros medem as pequenas vibrações da parede resultantes da propagação da onda de tensão. A caixa de canais e o computador com o *software* recomendado geram o sinal digital de maneira a depois mais tarde seja possível analisar os dados.

### 3.4.7. Georadar

A técnica de inspeção georadar baseia-se na emissão de ondas eletromagnéticas, através de um solo ou de um dado material de construção, e na receção das reflexões originadas por objetos e camadas de materiais distintos (Fernandes & Lourenço, 2007).

O sistema georadar (**Figura 52**) é constituído por uma unidade de controlo, uma antena com frequência adaptada ao caso em estudo, uma unidade de visualização e por fim uma unidade de armazenamento de dados. Resumidamente, gera-se e configura-se o sinal na unidade de controlo, as antenas emitem a radiação eletromagnética, registam as reflexões e transformam a informação digital, onde fica registada por fim na unidade de armazenamento (Fernandes & Lourenço, 2007).



**Figura 52-** Exemplo equipamento georadar.  
Fonte: (Mala, 2015)



Da vasta gama de aplicações do georadar as mais usuais são a detecção de infraestruturas enterradas, a determinação da geometria em estruturas de alvenaria, a detecção de humidade e ainda a determinação de armadura existente em elementos estruturais de betão.

### 3.5. Análise das propriedades do granito.

Quando se pretende estudar um determinado tipo de granito é necessário estudar as suas propriedades Químicas, Físicas, Geológicas e Mecânicas (Bravães, 2009).

No caso das propriedades químicas, deve-se examinar a sua composição química, embora a composição varie muito de uma amostra para outra, a sua reatividade, pois algumas amostras possuem elementos químicos capazes de reagir, e ainda a sua durabilidade.

Os ensaios para analisar as propriedades químicas mais utilizados são as fitas colorimétricas e microscópico eletrónico de varredura, que permite a partir da análise de uma pequena amostra criar espectros da constituição química.

Os ensaios para analisar as propriedades mecânicas mais utilizados são o ensaio a compressão (**Figura 54a**), ao corte (**Figura 54b**), a flexão (**Figura 54c**) e ainda ao desgaste (ensaio de los angeles). No caso do ensaio a compressão, permite através de provetes cúbicos ou cilíndricos (caso de carotes), determinar a carga de rotura e o módulo de elasticidade.



**Figura 54- Ensaio para analisar as propriedades mecânicas mais recorrentes: a) Ensaio de compressão em granito; b) Ensaio ao corte em granito; c) Ensaio à flexão em granito;**



Relativamente a recolha de carotes, é realizada com a utilização de um caroteadora (**Figura 55**), máquina de corte rotativa provida de coroas com dentes de diamante, e deve ser efetuada de modo a minimizar os danos na amostra. No entanto, na maior parte dos casos, devido à elevada heterogeneidade e reduzida coesão das paredes de edifícios antigos, a carote acaba mesmo por sofrer deterioração e desagregação, inviabilizando a aplicação desta técnica. Deste modo, após a carotagem há que ter em atenção o estado da amostra a ensaiar em laboratório, verificar as suas faces e muitas vezes deve se proceder a retificação das faces.



**Figura 55-** Exemplo de caroteadora. Fonte: (Maquesonda, 2014)

Nas propriedades físicas deve-se identificar a sua cor, o seu peso específico, a sua porosidade (fator importante para avaliar o numero de vazios que a constitui), a sua impermeabilidade, absorção, dureza e, por fim, a sua deformabilidade, através da obtenção do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

Por último, nas propriedades geológicas devemos analisar a composição mineralógica, a textura, a estrutura, o estado e alteração, as fraturas e a génese.

### **3.6. Conclusões**

A elaboração deste capítulo permitiu o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da alvenaria e ainda das principais patologias na alvenaria de pedra, o que possibilitou a realização de um trabalho de campo mais eficiente para identificar os elementos estruturais e as anomalias da construção em alvenaria.

Relativamente as técnicas de inspeção e diagnóstico, através da pesquisa foi possível reconhecer as técnicas mais interessantes para utilizar, em ensaios de campo ou laboratório. A investigação sobre estas técnicas possibilitou conhecer quais as condições, os locais mais adequados para amostragem e ainda o equipamento necessário para uma boa execução destas técnicas.

## **CAPÍTULO 4. Levantamento Geométrico e de Anomalias**

### **4.1. Introdução**

No presente capítulo apresenta-se o levantamento da geometria das portas da Fortaleza de Almeida, bem como as principais anomalias visualizadas durante o período de trabalho de campo. Na última secção do capítulo apresenta-se a recolha de amostras para análise em laboratório, através de ensaios com sulfatos e análise com microscopia eletrónica com análise química por espectroscopia de dispersão de energias (MEV-EDE).

### **4.2. Levantamento Geométrico**

O levantamento geométrico foi realizado nas portas interior e exterior de São Francisco e ainda na porta interior de Santo António. Exclui-se a análise geométrica da porta exterior de Santo António, visto que foi reabilitada em 2007, não apresentando anomalias significativas que justifique a sua análise.

#### **4.2.1. Análise da informação existente**

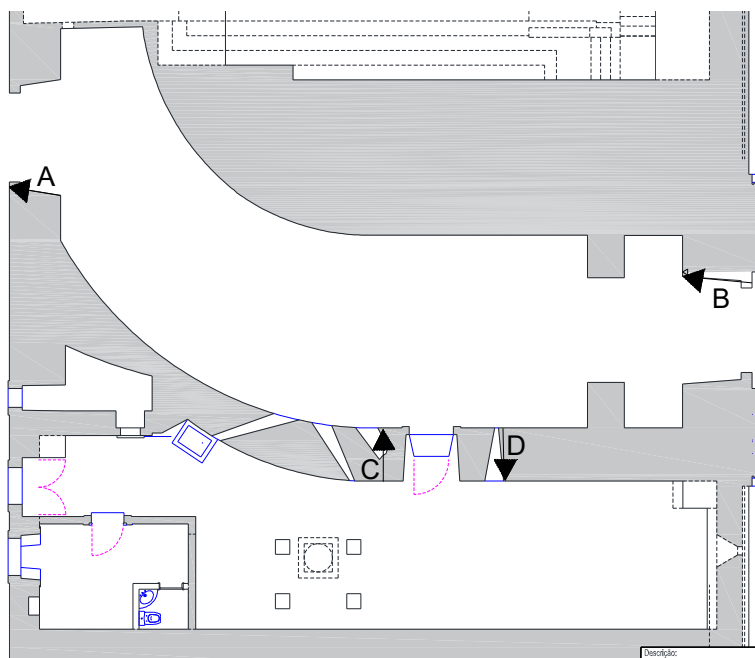
Na análise da geometria das portas recorreu-se primeiramente ao levantamento geométrico existente fornecido pela Câmara Municipal de Almeida, onde se procedeu posteriormente e na fase de campo à verificação e validação dessa informação. No levantamento dos elementos construtivos e estruturais foi utilizado um distanciómetro laser e ainda de uma fita métrica, sempre com o especial cuidado de repetir a medição em cada ponto ou dimensão, de forma a minimizar possíveis erros. Os dados recolhidos permitiram concluir que as plantas existentes se encontram geometricamente de acordo com observado no terreno. Contudo não foi possível determinar a geometria das paredes em contacto com o terreno. O levantamento das paredes em contacto com as terras foram executados no CAPÍTULO 5, através da execução de ensaios não destrutivos in situ. Os levantamentos geométricos dos pisos térreos das portas magistrais e da porta exterior de São Francisco estão representados no Anexo 2.

#### 4.2.2. Levantamento da morfologia das paredes de alvenaria

O levantamento da morfologia das paredes foi executado nas portas magistrais de Almeida de forma a conhecer o número de panos que as constitui, verificar a existência dos elementos de travamento e ainda conhecer um pouco melhor o seu núcleo.

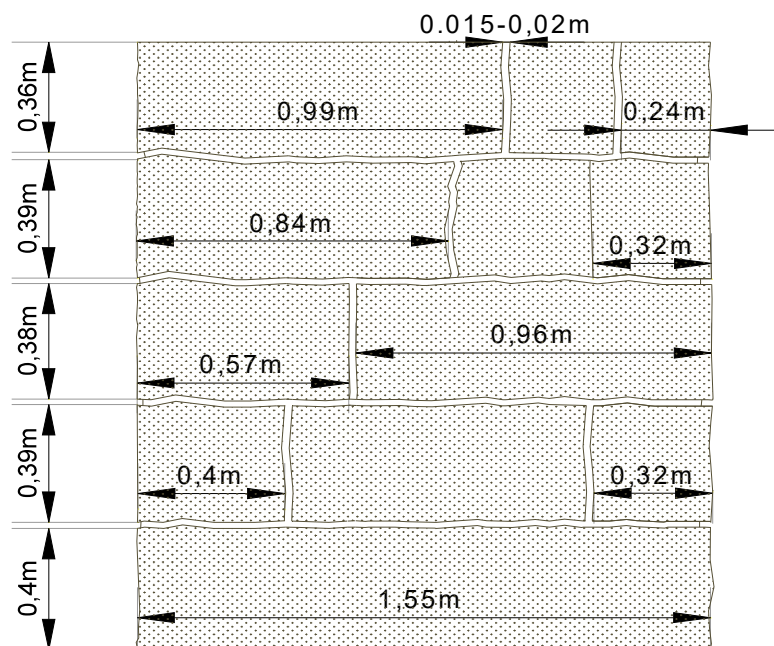
##### Morfologia das paredes na porta magistral de São Francisco.

Na porta magistral de São Francisco estudaram-se 2 alçados de parede (A e B) e 2 secções transversais (C e D) pertencentes ao piso térreo da porta. Para todos os locais apenas se analisou até aproximadamente 2 m de altura. Na **Figura 56** estão representados 4 locais analisados na porta magistral de São Francisco.



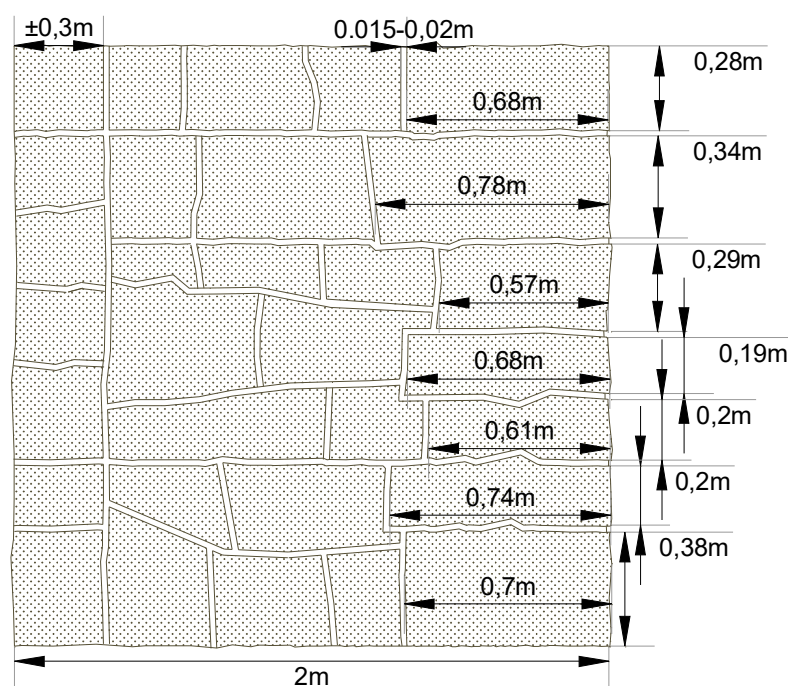
**Figura 56-** Locais de análise das morfologias de parede de alvenaria analisados na porta magistral de São Francisco.

A análise da secção de parede do local A (**Figura 57**) permite visualizar a existência de dois panos de alvenaria com ligação, juntas alinhadas regulares e assentamento preferencialmente horizontal. A espessura total da parede ronda os 1.55m e a espessura das juntas é variável entre 1.5cm e 2cm. A altura de cada fiada da parede analisada é de aproximadamente 0.4 m.



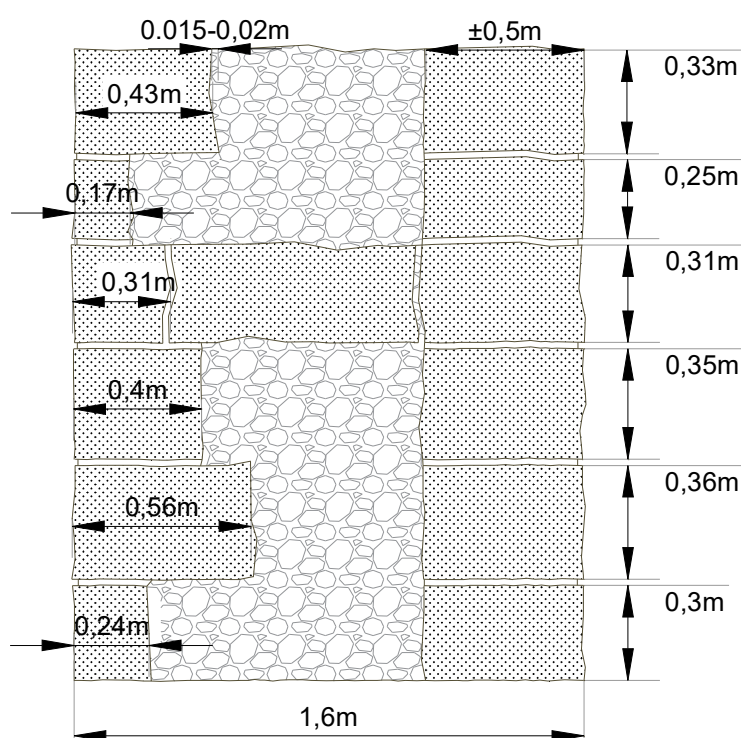
**Figura 57-**Alçado de parede da parede da porta magistral de São Francisco no local A, com dimensões em metros.

Na análise da secção de parede do local B (**Figura 58**) visualizou-se existência de três panos de alvenaria sem ligação, juntas maioritariamente desalinhadas e assentamento horizontal e ainda um terceiro pano simples sem ligação aos anteriormente referidos de 0,3 m de espessura que constitui o arco de entrada da porta. A espessura total da parede ronda os 2 m e a espessura das juntas é variável entre 1,5 cm e 2 cm.



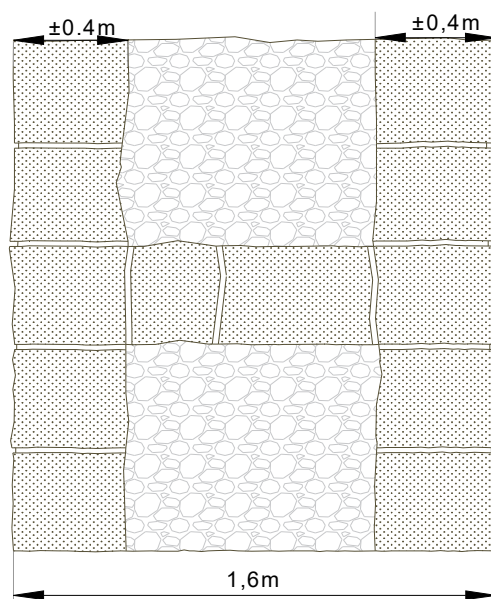
**Figura 58-** Alçado da parede da porta magistral de São Francisco no local B, com dimensões em metros.

A secção de parede do local C (**Figura 59**) permitiu detetar existência de três panos sem ligação, juntas alinhadas um pouco irregulares e assentamento horizontal. A espessura total da parede é aproximadamente 1.6m e a espessura das juntas é variável entre 1.5cm e 2cm. Relativamente ao núcleo entres os dois panos de alvenaria não é possível afirmar nada acerca a sua constituição uma vez que não é possível a sua visualização direta, porém existe forte suspeita com base em alguns furos realizados nas paredes que seja um material de enchimento (terra ou argamassa fraca misturado com pequenas pedras).



**Figura 59-** Secção da parede da porta magistral de São Francisco no local C, com dimensões em metros.

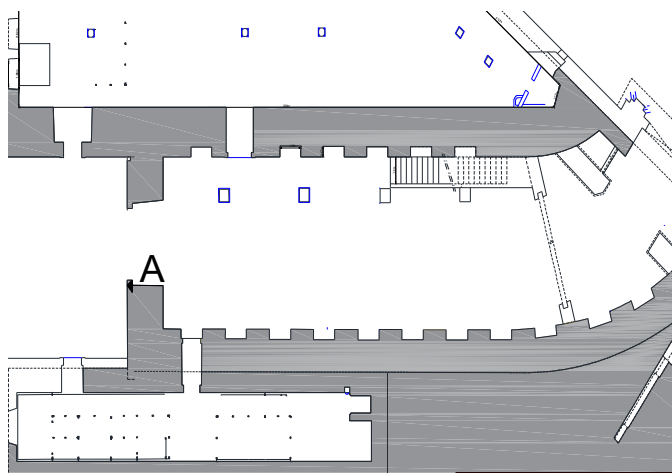
Na **Figura 60** está representado a secção de parede de alvenaria do local D, onde é possível a existência de três panos de parede. Os panos exteriores têm espessura aproximada de 40 cm, juntas maioritariamente alinhadas irregulares e assentamento preferencialmente horizontal. Não foi visível afirmar a existência de ligações entres os panos. A espessura total da parede é cerca de 1.6 m e acerca do seu núcleo tal como a secção anterior não é possível afirma qualquer constituição devido a inacessibilidade.



**Figura 60-** Secção da parede da porta magistral de São Francisco no local D, com dimensões em metros.

### Morfologia das paredes na porta magistral de Santo António

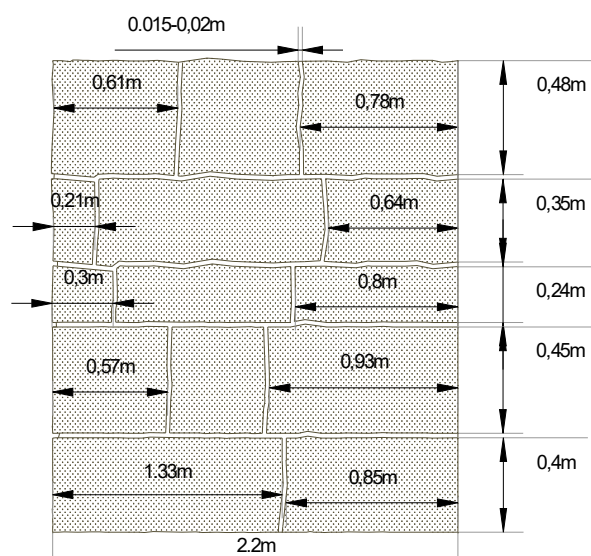
Na porta magistral de Santo António estudou-se apenas um local (A) de uma alçada de parede pertencente ao piso térreo da porta, pois o tempo das campanhas em campo não permitiu a execução de análises noutros locais. Na **Figura 61** está representado o local analisado na porta magistral de Santo António.



**Figura 61-** Local de análise da secção de parede de alvenaria analisada na porta magistral de Santo António.

A análise do alçado de parede do local A (**Figura 62**) permite visualizar a existência de três panos de alvenaria com ligação, juntas alinhadas regulares e assentamento horizontal.

A espessura total da parede ronda os 2.2 m e a espessura das juntas é variável entre 1.5 cm e 2 cm.



**Figura 62-** Alçado da parede da porta magistral de Santo António no local A, com dimensões em metros.

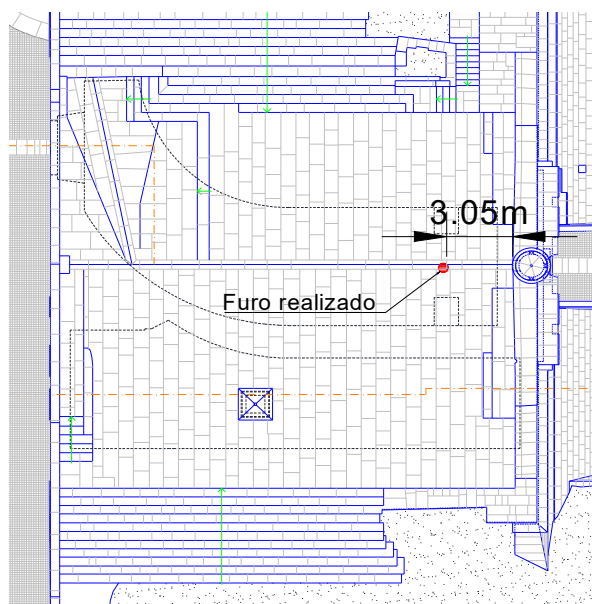
#### 4.2.3. Levantamento da morfologia dos arcos das portas magistrais

Na porta magistral de São Francisco para o conhecimento da secção do arco houve necessidade de perfurar desde a cobertura até ao final da secção, com o auxílio de um berbequim com uma broca adiamantada com 1 m de comprimento e 2cm de diâmetro. Na **Figura 63 e Figura 64** está representada a perfuração realizada.



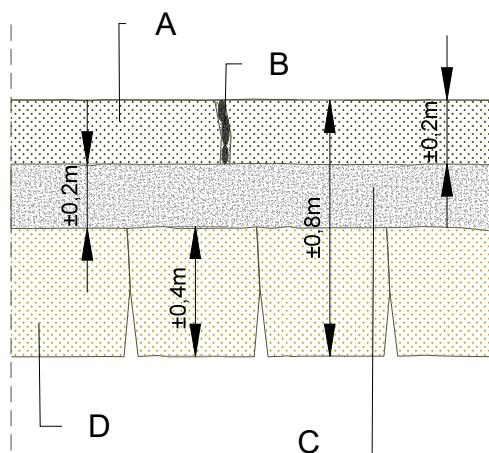
**Figura 63-** Perfuração realizada na cobertura da porta magistral de São Francisco: a) Início de furo; b) Final de furo.





**Figura 64-** Localização em planta do furo executado na cobertura da porta magistral de São Francisco.

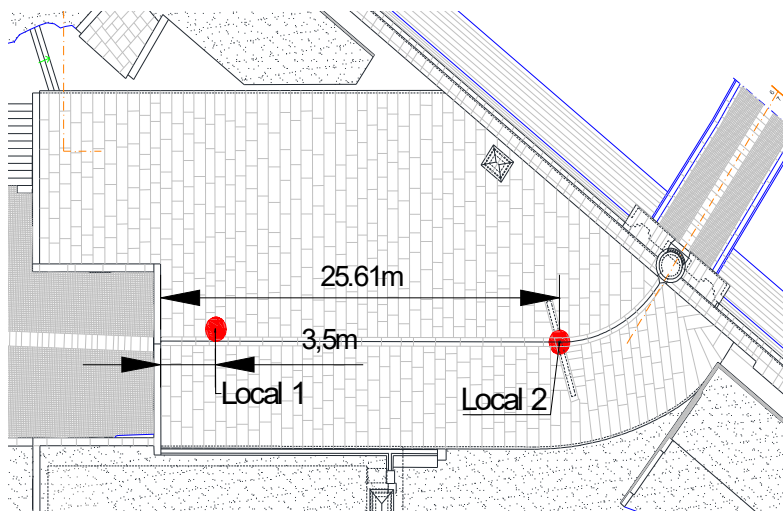
A perfuração executada na cobertura permitiu observar que a secção é constituída por uma camada de lajeado de granito com cerca de 20 cm de espessura, uma camada de material de enchimento (material britado com algumas pedras e argamassas cimentícias) com aproximadamente 20 cm de espessura e, por fim, um arco estrutural de granito com cerca de 40 cm de espessura. De notar que a espessura do material de enchimento é variável, uma vez que a distância entre o arco estrutural e o lajeado da cobertura é inconstante ao longo da mesma. Na **Figura 65** está representada a secção obtida após a análise da perfuração.



**Figura 65-** Constituição da secção obtida após a análise da perfuração na cobertura da porta magistral de São Francisco na zona da perfuração: A) Lajeado granítico de cobertura; B) Junta com cerca de 3cm de espessura; C) Camada de enchimento constituído por materiais britados e argamassas cimentícias; D) Arco estrutural.

Na porta magistral de Santo António o conhecimento da secção do arco foi realizado em dois locais da cobertura: um primeiro local (Local 1) perto da saída da porta onde não foi possível a perfuração da totalidade da secção e um segundo (Local 2) numa zona onde existe um orifício

utilizado anteriormente no mecanismo de alçapão da porta. A localização dos locais de estudo está representada na **Figura 66**.

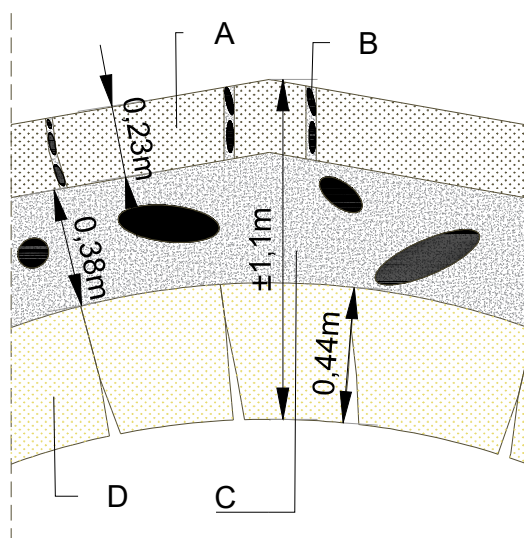


**Figura 66-** Localização em planta dos locais de análise executados na cobertura da porta magistral de Santo António.

A perfuração executada no local 1 permitiu observar uma primeira camada com entre 20 e 25cm, sucedida de 40cm de matéria de enchimento(material britado com algumas pedras e argamassas cimentícias). Neste local não foi possível perfurar mais pois a broca não perfurava a partir desta profundidade, uma vez que se tinha atingido o arco estrutural e a broca tinha tendência para aquecer. Durante esta perfuração detetou-se a presença de resinas em algumas zonas da camada de enchimento. Esta presença é possível ter origem na injeção efetuada na intervenção de 1986, em que se pretendia impermeabilizar a cobertura.

A observação no local 2 permitiu complementar às camadas obtidas no local 1 a existência de um arco estrutural com cerca de 45 cm de espessura, perfazendo assim uma espessura total de secção com aproximadamente 1.1 m de espessura.

Tal como a porta magistral de São Francisco, na porta de Santo António a espessura da camada de material de enchimento é variável ao longo da cobertura. Na **Figura 67** está representada a secção obtida após a análise do Local 1 e 2.



**Figura 67-** Constituição da secção obtida após a análise do local 1 e 2 na cobertura da porta magistral de Santo António : A) Lajeado granítico de cobertura; B) Junta com cerca de 3cm de espessura; C) Camada de enchimento constituído por materiais britados, pedras de pequena dimensão e argamassas cimentícias; D) Arco estrutural.

#### 4.2.4. Levantamento Fotogramétrico

O levantamento fotogramétrico foi realizado nas fachadas principais das portas magistrais de maneira a possibilitar um levantamento global das anomalias e geometria das fachadas. Dado a dimensão das imagens e de forma a tirar o máximo partido da qualidade das imagens recolhidas optou-se pela representação destas no Anexo 2.

No levantamento fotogramétrico das portas é possível visualizar varias anomalias estruturais, como é o caso de deformações para fora do plano e a presença de fendas e imensas anomalias não estruturais (escamação, desgaste, ataque biológico, entre outras). Estas anomalias serão abordadas de uma forma mais exhaustiva na secção seguinte.

#### 4.3. Levantamento das anomalias

O levantamento de anomalias foi realizado nas portas interior e exterior de São Francisco e ainda na porta interior de Santo António. Exclui-se a o levantamento de anomalias da porta exterior de Santo António, visto que foi reabilitada há poucos anos e as anomalias presentes não são significativas, demonstrando-se, assim, desinteressante o estudo da mesma. Como complemento a este levantamento encontra-se no Anexo 3 o mapeamento completo das anomalias nas portas analisadas.

### 4.3.1. Porta exterior de São Francisco

#### Alçado principal

No alçado principal da porta de São Francisco identificou-se ao nível de anomalias não estruturais o desgaste no granito, o ataque por líquenes e ainda o destacamento de argamassas nas juntas. Relativamente ao desgaste (*Figura 68*) existente no granito, principalmente na zona do arco de entrada e no brasão da fachada, este leva a suspeitar que a ação do vento juntamente com outros fenómenos meteorológicos adversos (chuva, gelo e degelo) ao longo de muitos anos provocou o atual desgaste.



**Figura 68-** Desgaste no granito do alçado principal: a) zona de entrada da porta; b) zona do brasão da porta.

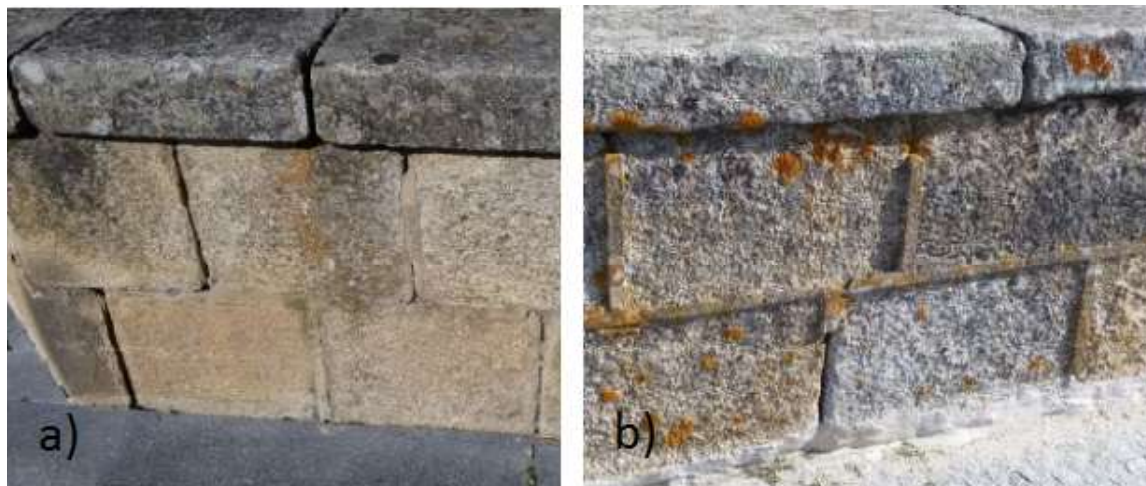
Relativamente a presença de líquenes (*Figura 69*), encontrada em diversas zonas da fachada principal, após uma pesquisa foi possível identificar que se trata de uma espécie de líquenes nitrófilos (SIGESTE, 2016), espécie que beneficia dos depósitos de pó e azoto para o seu desenvolvimento.



**Figura 69-** Locais com presença de líquenes: a) zona do arco principal de entrada; b) zona do muro de suporte da fachada.



Quanto ao destacamento de argamassa (**Figura 70**), esta verificou-se essencialmente nos muros de proteção da ponte em alvenaria de acesso à fachada principal da porta exterior de São Francisco. A deterioração da pedra e/ou alguns movimentos dos elementos estruturais poderá estar na origem do destacamento verificado.



**Figura 70-** Destacamento de argamassa das juntas de alvenaria: a) zona junto á rotunda; b) zona junto á ponte .

Ao nível de anomalias estruturais, no alçado principal da porta exterior de São Francisco visualizou-se a presença de uma fenda na parede da fachada principal e deformações fora do plano do muro de suporte da fachada principal e na ponte de alvenaria. Relativamente à fenda no muro de suporte da fachada principal (**Figura 71**), esta situa-se junto ao cunhal e com cerca de 2 cm de abertura máxima ao longo das juntas. É possível que esta esteja associada ao excessivo impulso horizontal de terras.



**Figura 71-** Fenda no muro de suporte: a) zona da fenda; b) zona ampliada da fenda.

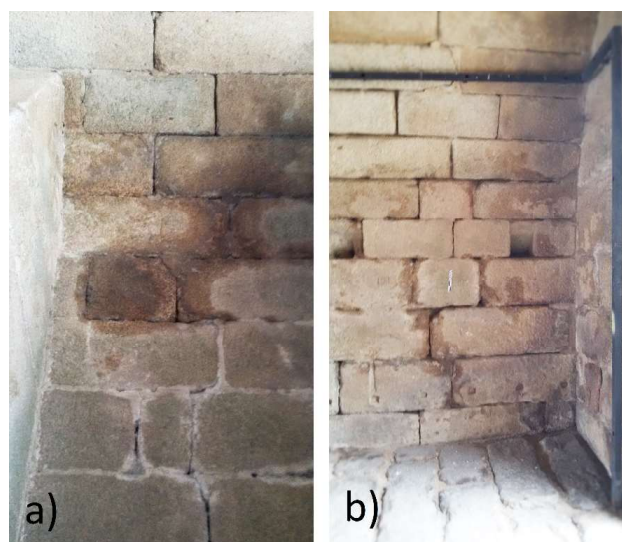
As deformações para fora do plano (**Figura 72**) foram detetadas na zona do muro de suporte da fachada principal e ainda no lado direito (de quem entra na porta) da ponte de alvenaria. Ambas são visíveis a olho nu, porém não aparentam ser excessivas.



**Figura 72-** Deformações para fora do plano: a) deformação para fora do plano no muro e suporte; b) deformação para fora do plano na ponte de alvenaria.

### **Interior da porta (zona de trânsito e Casa das Armas)**

Na zona de trânsito pertence ao interior da porta exterior de São Francisco detetou-se como anomalias não estruturais a presença de manchas de humidade, o destacamento das argamassas das juntas da alvenaria, o desgaste no granito e ainda a presença de musgo na alvenaria. As manchas de humidade (**Figura 73**) foram visualizadas em maior quantidade na parede de alvenaria encostada ao terreno. A presença contínua de humidade nestes locais pode prejudicar a conservação dos materiais, uma vez que a variação de temperatura no local propicia-se a ciclos de gelo e degelo.



**Figura 73-** Locais com presença de manchas de humidade: a) local junto a entrada; b) local junto a saída.



O destacamento da argamassa (**Figura 74**) foi visualizado em toda a alvenaria pertencente ao interior da zona de trânsito da porta exterior de São Francisco. Porém deve-se se destacar a zona superior do arco estrutural da porta como o mais afetado, pois existem locais onde é visível a ausência de argamassa na junta até à profundidade de 7 a 9 cm, relativos a face exposta do granito.



**Figura 74-** Local com destacamento de argamassa das juntas de alvenaria.

No granito visualizou-se um desgaste superficial nas faces expostas e mais profundo nas zonas de bordo da face (**Figura 75**). O desgaste e o processo de deterioração superficial é visível através das simples passagem da mão sobre a face pedra, donde se denota imediatamente uma perda de material. No caso do desgaste nas arestas, observam-se bastante arredondadas e, em alguns locais, uma considerável falta de material.



**Figura 75-**Desgaste nas faces e zonas periféricas das pedras: a) teto do arco; b) parede junto a entrada.

A presença de musgo foi visualizada maioritariamente adjacente a zonas de presença de humidade, tal como era de esperar (**Figura 76**). Denotar, também, que a seu crescimento é maior nas juntas de alvenaria, pois a argamassa das juntas possui um poder de absorção maior que o das pedras.



**Figura 76-** Local com a presença de musgo.

Ao nível de anomalias estruturais, na zona de trânsito da porta apenas se detetou uma possível fenda no arco com cerca de 1 cm de largura (**Figura 77**). A fenda, apesar de acompanhar maioritariamente a zona de das juntas de alvenaria, possui locais em que se denota que houve fendilhação na unidade de alvenaria. A origem desta fenda poderá estar relacionada com um erro construtivo (pedras com pouca sobreposição) ou então a um pequeno movimento após a construção da porta.



**Figura 77-** Possível fenda no arco da zona de transição a porta exterior de São Francisco.

Na Casa das Armas pertencente ao interior da porta exterior de São Francisco apenas se detetou uma anomalia estrutural. Trata-se de um movimento anormal das pedras (**Figura 78**) da parte superior do arco. Porém é uma vez que as juntas de argamassa não divulgam nenhum deslocamento após a execução das mesmas, leva-nos a concluir que a zona encontra-se estabilizada.





**Figura 78-** Movimento anormal nas pedras da zona superior do arco da casa das armas.

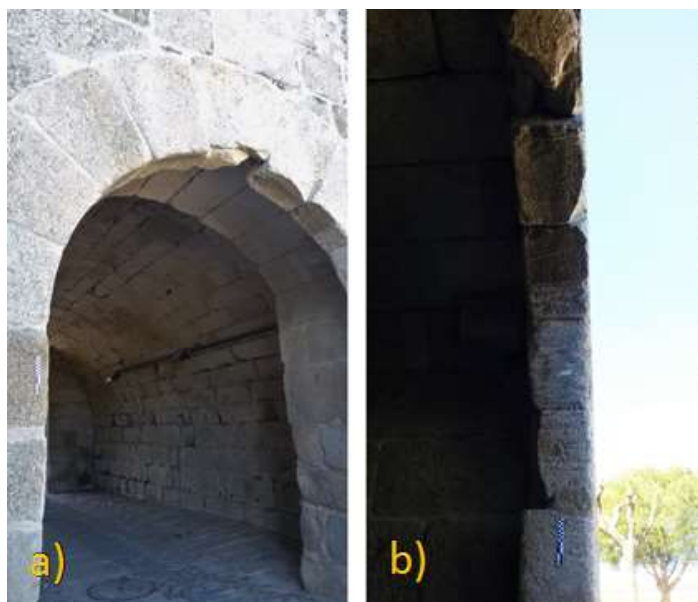
### **Alçado posterior**

No alçado posterior da porta exterior detetaram-se escorrências de resinas, imperfeições no arco de saída da porta e ainda vegetação crescente, sendo estas referidas exclusivamente anomalias não estruturais. No caso das escorrências de resina (*Figura 79a*), foram visualizadas nas zonas próximas das janelas do alçado traseiro, tem como origem anteriores injeções efetuadas na porta e tendo a sua escorrência ter aumentado ao longo dos anos com a variação das temperaturas. Já a vegetação crescente foi verificada numa reentrância do alçado traseiro da porta e pode ser visualizada na *Figura 79b*).



**Figura 79-** Exemplo de escorrências de resinas e vegetação crescente no alçado traseiro da porta exterior de São Francisco: a) local com escorrência de resinas; b) local com vegetação crescente.

Relativamente às imperfeições do arco (**Figura 80**), foram visualizadas na zona superior do arco do alçado posterior o que leva a supor que poderão ter origem em ataques balísticos em tempos remotos ou a choque recentes do tráfego automóvel.



**Figura 80-** Imperfeições no arco do alçado traseiro da porta de exterior de São Francisco: a) local das imperfeições no arco; b) ampliação do local das imperfeições do arco.

### Cobertura

Na cobertura da porta exterior de São Francisco apenas se detetou um assentamento ligeiro das escadas em relação à cobertura, facto comprovado pela descida das escadas face a argamassa da junta original.

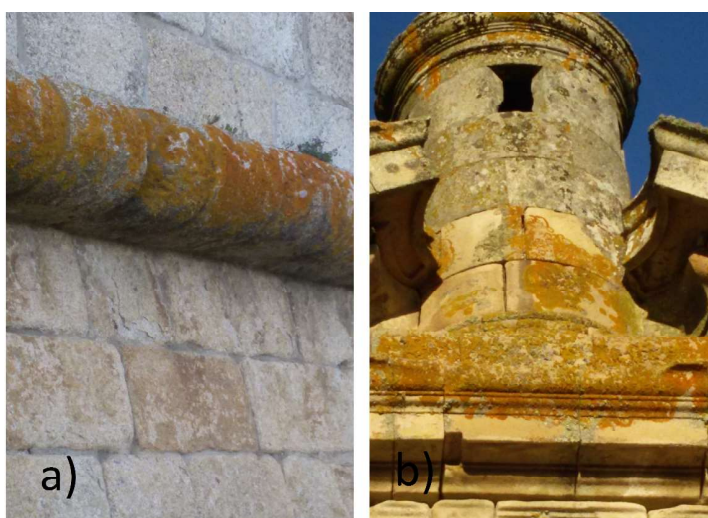


**Figura 81-** Assentamento das escadas de acesso a cobertura: a) zona do assentamento das escadas; b) ampliação da zona de assentamento das escadas.

### 4.3.2. Porta magistral de São Francisco

#### Alçado principal

No alçado principal da porta magistral de São Francisco observou-se a nível de anomalias não estruturais a existência de líquenes, a perda superficial de material no granito e ainda deterioração da reconstrução de elementos decorativos. A existência de líquenes visualizou-se um pouco por toda a fachada principal, embora seja mais concentrada nas zonas representadas na **Figura 82**.



**Figura 82-** Locais com presença de líquenes: a) zona do muro da fachada; b) zona por cima do arco de entrada da porta.

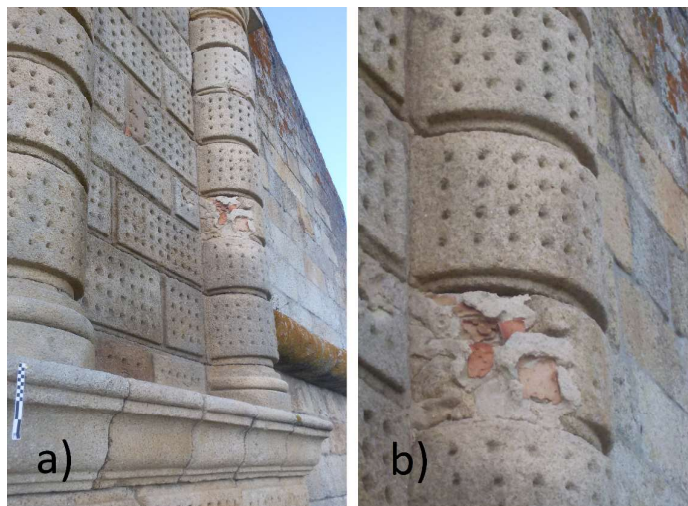
A perda superficial de granito (**Figura 83**) é visível principalmente nas zonas dos muros de suporte da fachada principal, local onde a pedra possui um grão de maior dimensão comparativamente com a pedra da zona central da fachada (granito decorativo de grão fino). Esta anomalia poderá estar ligada a algum método de conservação para pedra realizado anteriormente, como é o caso da aplicação por vezes de vernizes.



**Figura 83-** Exemplos de locais com perda superficial de material no granito.

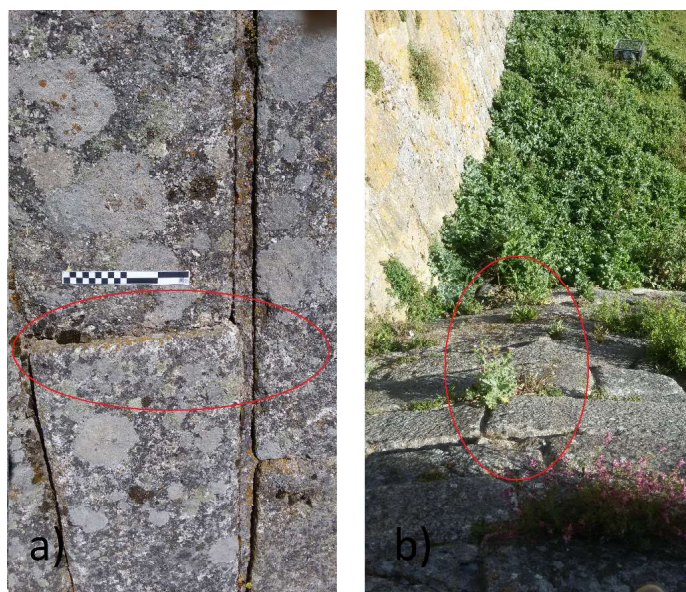


A deterioração da reconstrução de elementos decorativos (**Figura 84**) visualizou-se na zona central da fachada principal da porta, mais precisamente em pilastras decorativas do lado direito de quem entra. Esta anomalia deve-se à utilização de argamassa não apropriada e de elementos cerâmicos (pontas de telha ou tijolos) para a reconstrução dos elementos.



**Figura 84-** Deterioração da reconstrução de elementos decorativos da fachada principal da porta exterior de São Francisco: a) zona dos elementos decorativos reconstruídos com deterioração: b) ampliação da zona dos elementos decorativos reconstruídos com deterioração.

Relativamente a anomalias estruturais, detetaram-se algumas deformações para fora do plano e ainda um assentamento. Na **Figura 85** e **Figura 86** está representado as principais deformações visualizadas, sendo as primeiras no muro do fosso do alçado e a segunda no pano direito de quem entra na ponte e alvenaria.

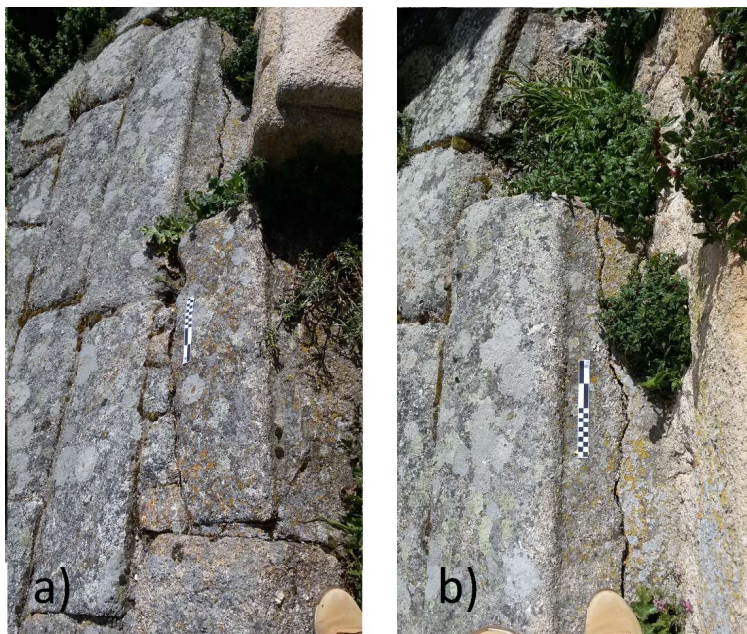


**Figura 85-** Deformações para fora do plano da fachada principal da porta magistral de São Francisco: a) zona do muro de suporte do lado direito junto ao fosso; b) zona do muro de suporte do lado direito junto ao fosso.



**Figura 86-** Deformações para fora do plano do muro da ponte da porta magistral de São Francisco.

O assentamento do muro do fosso foi denotado no lado esquerdo do alçado através da diferença de cota entre os dois lados da junta de argamassa fendilhada, revelando um assentamento de cerca de 1 cm.



**Figura 87-** Fissura devido a assentamento de muro do fosso: a) local da fissura; b) ampliação do local de fissura.



### **Interior da porta (zona de trânsito e Posto de Turismo)**

Na zona de trânsito pertencente ao interior da porta magistral de São Francisco visualizou-se a presença das seguintes anomalias não estruturais: presença de fungos e líquenes, manchas de humidade na alvenaria, florescências e ainda deterioração do granito. A presença de fungos e líquenes (**Figura 88**) detetou-se maioritariamente no teto do túnel, talvez devido a existente humidade constante visualizada ao longo do decorrer das semanas de campo. As manchas de humidade (**Figura 89**) são visíveis um pouco por todo interior do túnel, havendo maior concentração na parede adjacente ao terreno e na cobertura. No caso das florescências (**Figura 90**) existentes na parede esquerda do túnel, a sua origem está associada á presença de sais , porém o seu crescimento após as intervenções de impermeabilização da cobertura aparenta estar anulado.



**Figura 88-** Presença de atividade biológica (fungos e líquenes) no teto do túnel da porta magistral de São Francisco.



**Figura 89-** Manchas de humidade nas paredes do túnel da porta magistral de São Francisco.



**Figura 90-** Florescências no túnel da porta magistral de São Francisco.

A deterioração do granito (**Figura 91**) revelou-se nesta porta uma anomalia bastante determinante, pois poderá contribuir para a instabilidade da estrutura. Foram visualizados vários locais onde grande parte do granito perdeu uma percentagem significativa de material e é inexistente nas juntas de argamassa na maioria da estrutura. Na zona do teto existem locais onde a falta de contacto entre pedras atinge a profundidade de 16 cm, o que pode pôr em causa a estabilidade do arco ao longo do túnel.

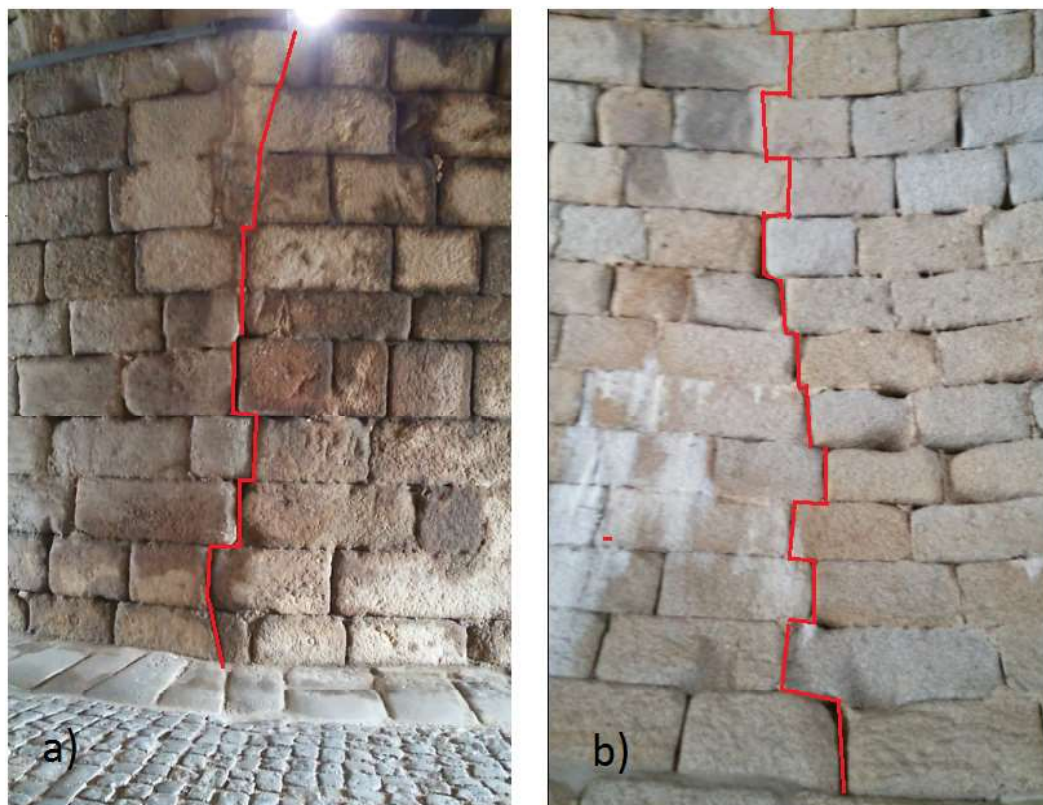


**Figura 91-** Deterioração no granito da porta magistral de São Francisco: a) deterioração no pilastra esquerdo da entrada da porta; b) parede direita junto a entrada da porta.

A nível de anomalias estruturais, apesar da existência de alguns deslocamentos pouco significativos nas pilastras da entrada, apenas se tornou relevante a possível existência de uma



fenda no túnel com uma abertura com cerca de 2 cm, que se estende ao longo de toda a secção transversal do arco naquela zona. A origem desta anomalia poderá estar associada a um erro construtivo, pois o local da fenda corresponde a transição da trajetória retilínea para curvilínea do arco e ao facto do cruzamento/embricamento das pedras neste local ser relativamente pequeno, tendo em conta a dimensão da estrutura. Por último e no Posto de Turismo, zona que sofreu reabilitação em 1992 e tem sido conservada cuidadosamente, não se detetou a existência de qualquer tipo de anomalia.



**Figura 92-** Possível fenda no túnel da porta magistral de São Francisco: a) trajetória da fenda no lado direito de quem entra na porta; b) trajetória da fenda no lado esquerdo de quem entra na porta.

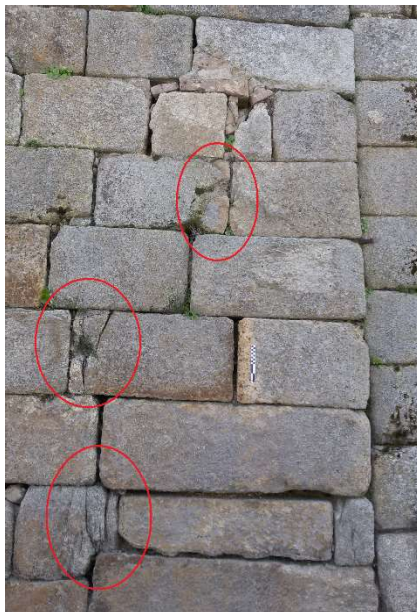
### **Alçado posterior**

No alçado posterior da porta magistral de São Francisco e ao nível de anomalias não estruturais visualizou-se a existência de vegetação e deterioração pontual na alvenaria, porém dado possuem dimensões insignificantes não serão detalhas neste trabalho.

Relativamente às anomalias estruturais, foi visualizado a existência de fendilharão pontual no granito e ainda deformações no alçado para fora do plano. A fendilhação pontual do granito (**Figura 93**), verificada no lado esquerdo do alçado, é consequência da má distribuição de



esforços resultantes de uma aparente reconstrução da alvenaria nesta zona, uma vez que é possível observar justas horizontais desalinhadas, originando mau contacto de superfície nas juntas, o que levou à rutura pontual das pedras nestes locais.



**Figura 93-** Fendilharão pontual no granito.

No caso de deformações para fora do plano (**Figura 94**), foi detetada a sua existência dos dois lados do alçado posterior. A origem da anomalia poderá estar relacionada nas pressões excessivas do terreno ao longo do tempo.



**Figura 94-** Deformações para fora do plano do muro no alçado traseiro: a) lado esquerdo de quem sai; b) lado direito de quem sai.

## Cobertura

Na cobertura observou-se a nível de anomalias não estruturais a presença de líquenes, musgo e vegetação, cavidades no lajeado e ainda a existência de um rebaixamento. A existência de líquenes, musgo e vegetação (**Figura 95**) visualizou-se um pouco por toda a cobertura da porta magistral embora haja maior concentração nas extremidades laterais, junto as escadas.



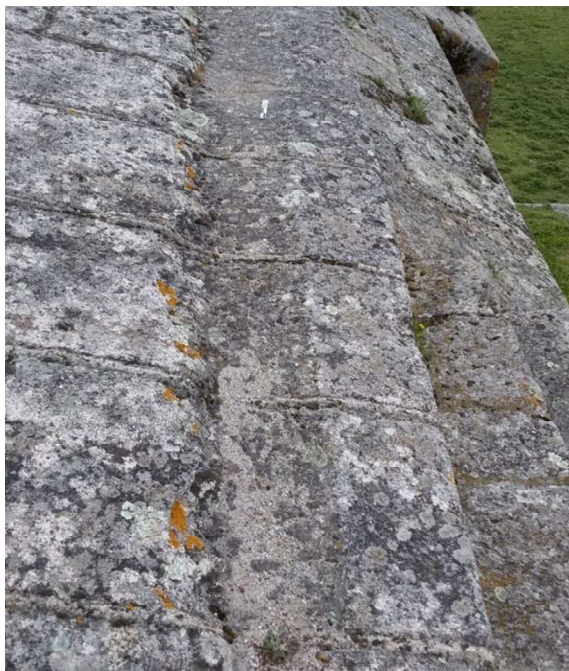
**Figura 95-** Presença de líquenes, musgo e vegetação na cobertura da porta magistral de São Francisco.

As cavidades no lajeado (**Figura 96**) identificaram-se um pouco por toda a cobertura e são resultantes de anteriores bombardeamentos à fortaleza. Estas anomalias requerem algum cuidado pois algumas delas possuem microfissuras que poderão facilitar a infiltração de água na estrutura. Na **Figura 97** esta representado um rebaixe no lajeado com cerca de 5 cm de profundidade com morfologia anormal, localizado na extremidade esquerda da cobertura da porta.



**Figura 96-** Cavidades no lajeado da cobertura, originados por antigos bombardeamentos.





**Figura 97-** Rebaixe com morfologia anormal na extremidade da cobertura.

Relativamente a anomalias estruturais na cobertura visualizaram-se assentamentos nos dias escadas de acesso a cobertura e ainda a fendas no lajeado da cobertura. Nos assentamentos, embora se denote e comprove pela **Figura 98** que já houve reabilitação, é visível que estes movimentos ainda não se encontram estabilizados uma vez que existem afastamentos da junta de argamassa em relação a pedra. Nas **Figura 99 e Figura 100** estão representados os locais dos assentamentos das duas escadas de acesso a cobertura da porta.



**Figura 98-** Fotografias de intervenções na cobertura: a) escadas do lado esquerdo; b) escadas do lado direito. (Fonte: SIPA)

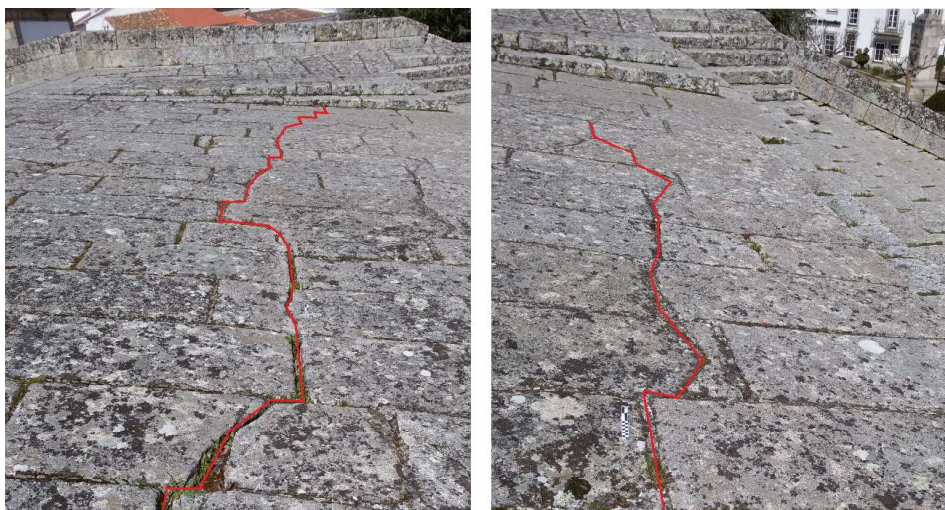


**Figura 99-** Assentamento nas escadas de acesso a cobertura do lado direito de quem entra na porta.



**Figura 100-** Local dos assentamentos das escadas de acesso à cobertura do lado esquerdo de quem entra na porta.

As fendas da cobertura, ambas localizadas no lado direito (de quem entra), revelam uma largura média de 2 cm em toda a sua extensão (**Figura 101**). Na origem destas fendas poderá estar em problemas originais construtivos que provocaram assentamentos de apoio estrutura ou mesmo assentamentos devido a compactação do solo a longo prazo.



**Figura 101-** Fendas na cobertura da porta magistral de São Francisco.



### 4.3.3. Porta magistral de Santo António

#### Alçado principal

No alçado principal da porta magistral de Santo António detetaram-se como anomalias não estruturais a existência de fungos, líquenes e vegetação, deterioração superficial do granito e ainda a ausência de escoamento eficiente de águas pluviais na ponte. Comparativamente aos alçados principais analisados, o da porta magistral é o que possui maior presença de fungos, líquenes e vegetação, talvez devido a orientação noroeste desta fachada. Na **Figura 102** está ilustrada a presença de fungos, líquenes e vegetação.



**Figura 102-** Presença de fungos, líquenes e vegetação na fachada principal da porta magistral de Santo António.

A deterioração superficial granito (**Figura 103**) foi identificada nos muros de suporte do alçado e ainda no granito de grão fino que constitui os elementos decorativos da entrada da porta magistral.



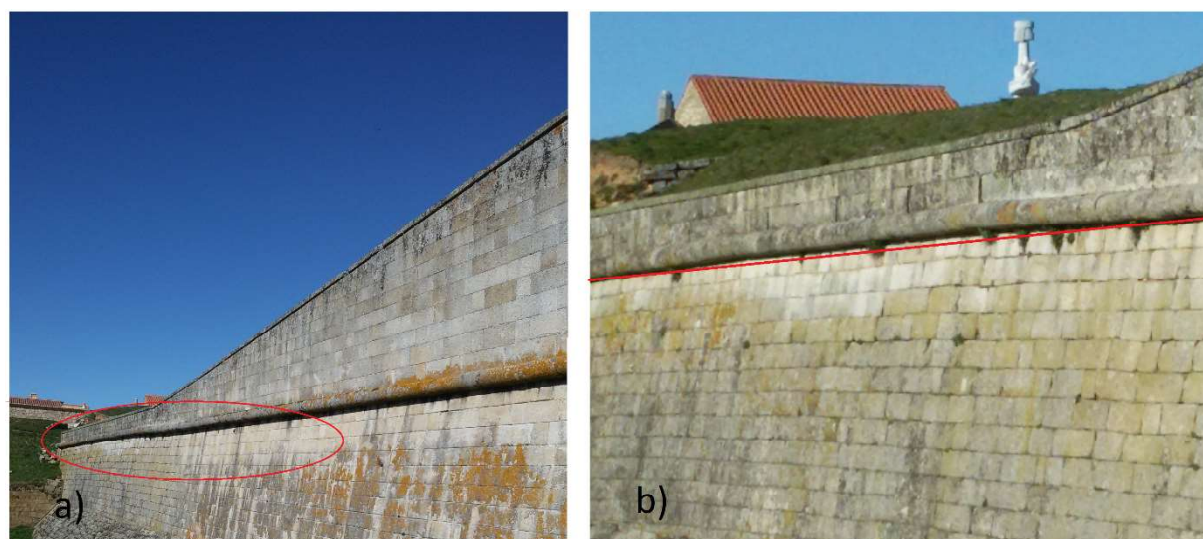
**Figura 103-** Deterioração superficial do granito.

Na ponte de acesso a entrada principal foi detetado a inexistência da maioria dos escoamentos nas laterais do pavimento (**Figura 104**). A ponte foi intervencionada à alguns anos depois de um desmoronamento de um muro de suporte desta, talvez devido à ausências de escoamento. A ausência do escoamento provoca a concentração de águas no pavimento o que pode provocar a longo prazo lavagem dos finos dos materiais de enchimento que constituem a ponte, perdendo assim estabilidade a estrutura.



**Figura 104-** Ausência de escoamento nos muros de segurança lateral da ponte de alvenaria: a) muro de proteção do lado esquerdo; b) muro de proteção do lado direito.

Relativamente a anomalias identificadas no alçado principal da porta magistral de Santo António visualizou-se a existência de deformações fora e no próprio plano. Dada a existência de algumas anomalias deste tipo, apenas se apresentou os dois casos, representado na **Figura 105 e Figura 106**. O levantamento mais pormenorizado destas anomalias é visível no Anexo 3.



**Figura 105-** Deformação no plano da fachada principal: local da deformação no plano; b) ampliação do local da deformação no plano.





**Figura 106-** Deformação no muro do fosso do lado esquerdo do alçado da porta magistral de Santo António.

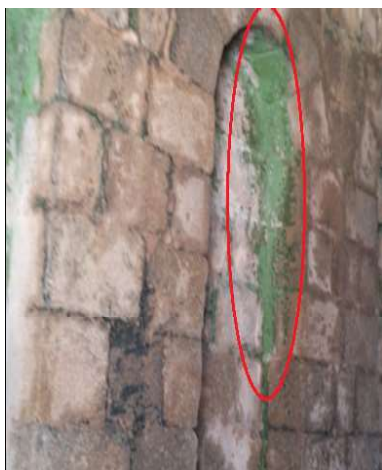
### **Interior da porta (zona de trânsito e anexos)**

No túnel de trânsito da porta magistral de Santo António as anomalias não estruturais detetadas foram as seguintes: eflorescências, presença de líquenes e fungos e ainda deterioração do granito. As eflorescências (**Figura 107**) foram visualizadas principalmente na zona do arco do túnel e possuem em alguns casos uma espessura de 1 cm. Trata-se de uma espessura bastante considerável e só possível de alcançar pela repetição deste processo milhares de vezes ao longo da história da porta. Porém tendo em conta a cor amarelada e as sucessivas visitas ao campo pode-se concluir que este fenómeno tem atividade nula atualmente, talvez devido a intervenção de impermeabilização executada no ano 1986 na cobertura desta porta.



**Figura 107-** Eflorescências no túnel da porta magistral de Santo António.

A presença de líquenes e fungos identificou-se principalmente nas cavidades decorativas junto a entrada pertencentes a parede esquerda (relativamente a quem entra na porta). A existência atividade biológica é originada pela presença de humidade proveniente do solo adjacente a parede em causa. Na **Figura 108** está representado um exemplo com a presença de fungos e líquenes e ainda manchas de humidade.



**Figura 108-** Presença de líquenes e musgo e ainda manchas de humidade no túnel da porta magistral de Santo António.

Tal como os restantes túneis analisados, o túnel da porta magistral de Santo António possui deterioração no granito da alvenaria e ausência de argamassa nas juntas. Trata-se de uma deterioração não uniforme para distribuída por todo o túnel, sendo as zonas do teto do túnel e das paredes mais expostas à secagem natural por ventilação as mais abrangidas. A origem deste fenómeno será estudada mais à frente noutros CAPÍTULO 5 e 6 após uma investigação mais pormenorizada das características dos materiais que constituem as portas.



**Figura 109-** Deterioração da alvenaria de granito da porta: a) zona do teto do túnel; b) zona de uma parede.

As anomalias estruturais detetadas durante na porta magistral de Santo António foram fendas e ainda movimentos de elementos estruturais. No caso das fendas foram visualizadas, uma primeira (**Figura 110**) num interior de uma cavidade decorativa do da parede do lado esquerdo junto a entrada e uma segunda (**Figura 111**) no teto do arco do túnel. A fenda no interior do elemento decorativo tem a espessura de aproximadamente de 0.7 cm e estende-se na vertical ao longo de toda a cavidade.





**Figura 110-** Fenda numa cavidade decorativa da parede do lado esquerdo junto a entrada do túnel da porta magistral de Santo António.

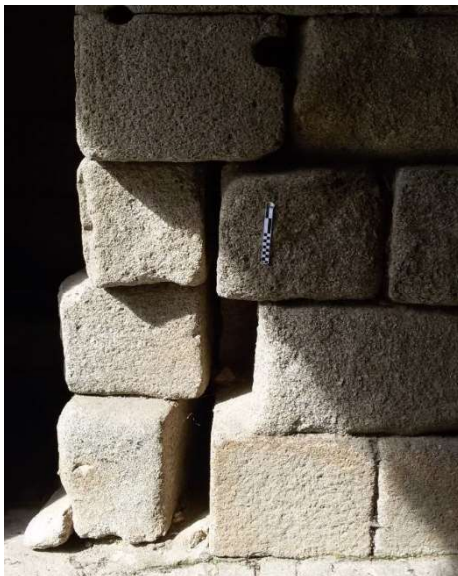
A fenda no teto do arco possui uma abertura de aproximadamente 2 cm e estende-se ao longo de quase todo o teto do arco. Esta fenda pode estar associada a movimentos da estrutura ou mesmo a erros construtivos, neste caso devido à reduzida justaposição das pedras que constituem o túnel nesta zona.



**Figura 111-** Possível fenda no teto túnel da porta magistral de Santo António.

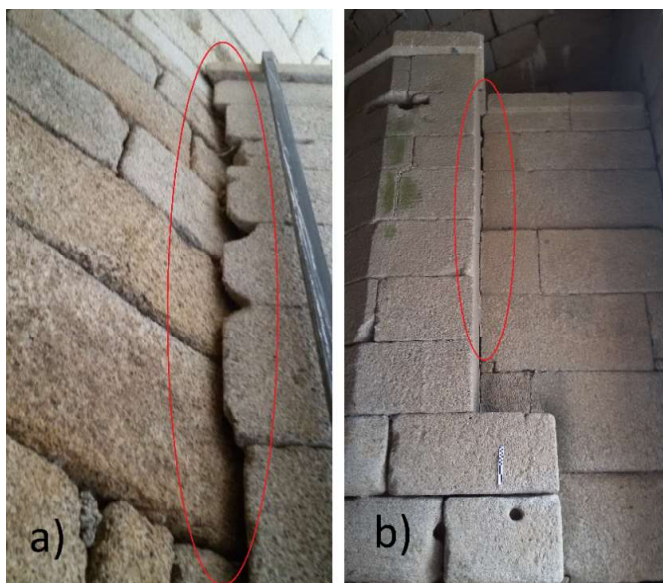
Por último, os movimentos nos elementos estruturais ocorreram em muitos pontos da estrutura, porém apenas se revelam serem mais significativos em dois casos. Um primeiro (**Figura 112**),

visível na pilastra do lado esquerdo de quem entra na porta magistral, onde as pedras da pilastra de encontram afastadas da posição inicial cerca de 10 cm para fora do pano.



**Figura 112-** Deslocamento das pedras na pilastra do lado esquerdo de quem entra na porta magistral de Santo António.

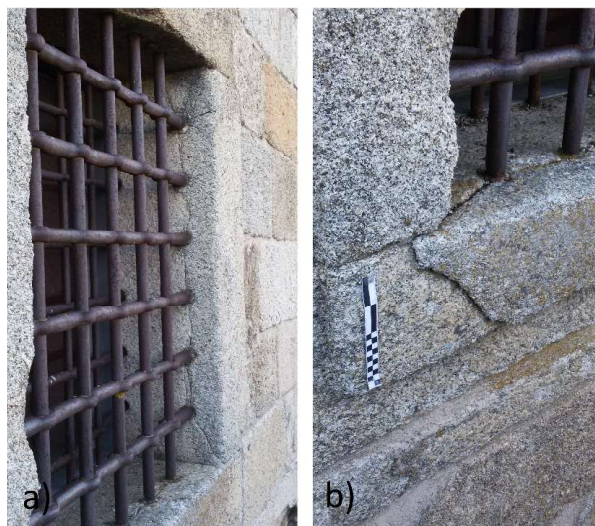
No segundo caso (**Figura 113**), visualizou-se várias aberturas na zona de encosto da pilastra direita com os restantes elementos. A origem destes movimentos poderá estar num assentamento na base da pilastra ou no esmagamento de alguma junta de argamassa da alvenaria que o constitui.



**Figura 113-** Possível assentamento ao pilastra do lado direito junto a entrada da porta magistral de Santo António.

### **Alçado posterior**

Tal como no alçado principal, o alçado posterior da porta magistral de Santo António possui deterioração superficial do granito e presença de líquenes e fungos, mas o que destaca deste alçado é a existência de fendas nas padieiras e nos peitoris das janelas (**Figura 114**). Estas fendas provêm da dilatação dos materiais ferrosos aplicados com a função de gradeamento.



**Figura 114-** Fendas das padieiras e peitoris da janela do alçado traseiro da porta magistral de Santo António: a) janela com fendas; b) ampliação de uma zona com fendas na alvenaria da janela.

### **Cobertura**

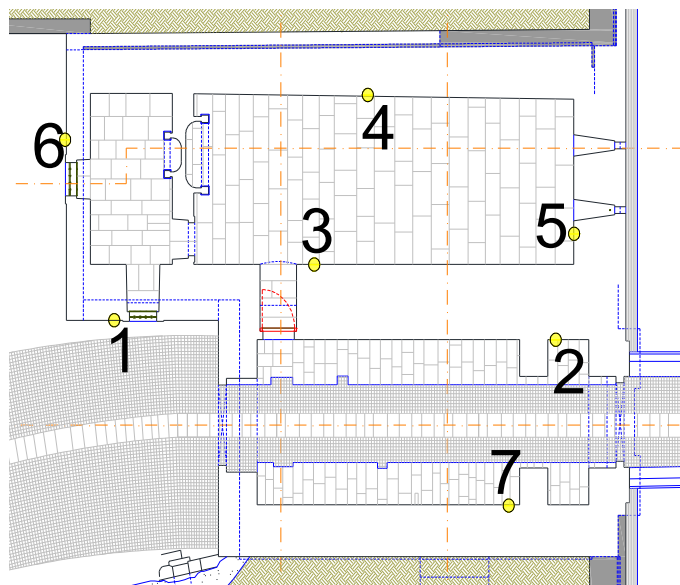
A cobertura da porta magistral de Santo António possui como anomalias não estruturais a presença de líquenes e musgos e ainda cavidades de antigos bombardeamentos. Na cobertura desta porta não se detetou qualquer tipo de anomalia estrutural.



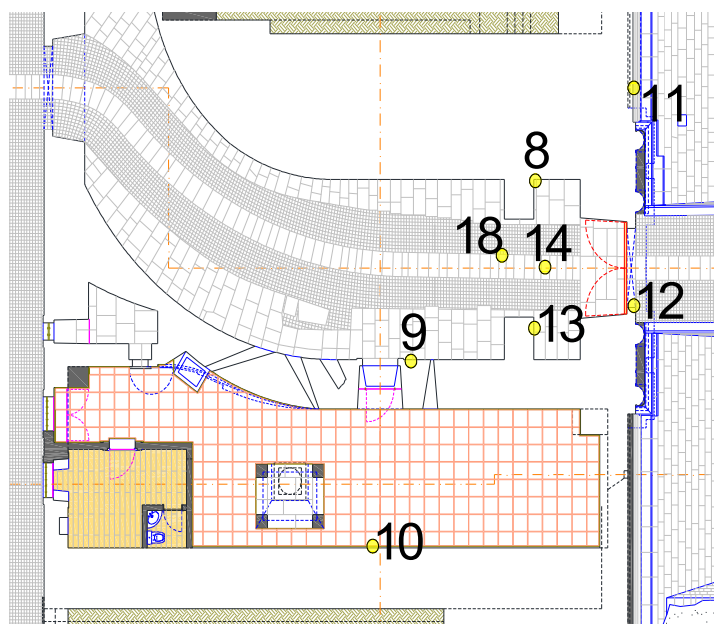
**Figura 115-** Presença de líquenes e musgo na cobertura da porta magistral de Santo António.

#### 4.4. Recolha de amostras para análise laboratorial

A recolha das amostras foi realizada em função das anomalias identificadas, tendo em vista uma investigação laboratorial de maneira a identificar a possível origem das mesmas. Nesta secção apenas será apresentada a localização dos locais de recolha das amostras. As identificações mais precisas da recolha bem como fotografias dos locais estão apresentadas no Anexo 4.



**Figura 116-** Levantamento de amostras na porta exterior de São Francisco.



**Figura 117-** Levantamento de amostras na porta magistral de São Francisco.





**Figura 118-** Levantamento de amostras na porta magistral de Santo António.

## 4.5. Conclusões

A elaboração deste capítulo permitiu através do levantamento geométrico a confirmação da veracidade todas as plantas existentes, o conhecimento da constituição das paredes em algumas zonas das portas e ainda saber a constituição das secções de arco dos túneis de trânsito.

O levantamento de anomalias permitiu detetar as principais anomalias existentes em cada porta estudada. As três portas analisadas possuem anomalias em comum, sejam estruturais ou não estruturais. Nas anomalias estruturais as mais visualizadas foram as deformações no plano e para fora do plano, a fendilhação e ainda alguns movimentos de elementos estruturais, tais como assentamentos. Relativamente as anomalias não estruturais, as mais presentes foram a existência de manchas de humidade, a presença de líquenes, musgos e vegetação, florescências e, por último, a degradação superficial do granito, sendo esta a que requer especial atenção.

Tendo em conta as anomalias encontradas, apresenta-se no final deste capítulo a recolhas das amostras para ensaios em laboratório, através da execução de MEV-EDE e análise expedita aos sulfatos, cujos resultados são apresentados e discutidos no CAPÍTULO 6.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **CAPÍTULO 5. Ensaaios não destrutivos in situ**

### **5.1. Introdução**

No âmbito da determinação das propriedades da estrutura das portas magistrais da Fortaleza de Almeida, realizaram-se cinco tipos de ensaios não destrutivos, nomeadamente ensaios sínicos diretos, ensaios sínicos indiretos, ensaios de impacto-eco, ensaios de georadar e por fim levantamento laser. Os ensaios de sínicos foram realizados em vários locais das paredes das portas magistrais, e tiveram como principal objetivo estimar a velocidade de propagação das ondas P, na alvenaria e na pedra, com o objetivo de determinar a morfologia e as propriedades mecânicas dos elementos estruturais. Os ensaios de impacto-eco foram realizados nas paredes das portas magistrais, tendo por objetivo a determinação da espessura e diferenciar possíveis panos das paredes. Os ensaios de georadar foram realizados nas paredes e cobertura e tiveram como objetivo complementar e validar as propriedades geométricas determinadas nos ensaios de impacto-eco. Por fim, o levantamento de laser foi realizado no interior das duas portas magistrais com o objetivo do levantamento da geometria atual e das anomalias, permitindo obter cortes da abóbada dos túneis para o cálculo do material perdido ao longo do tempo.

### **5.2. Ensaaios sínicos**

#### **5.2.1. Ensaaios sínicos diretos**

Nesta secção são apresentados ensaios realizados in situ no interior dos túneis das duas portas magistrais da Fortaleza de Almeida, de maneira a conhecer as velocidades de propagação das ondas na pedra (unidades) e na alvenaria. Os resultados podem ser apresentados na forma de gráficos de correlações, espectros de frequência e ainda mapas de velocidades. A sua análise pode ser realizada no domínio do tempo e no domínio da frequência.

#### **Equipamento e procedimento**

O equipamento utilizado foi disponibilizado pelo LEST (Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho) e consiste em:

- um acelerómetro PCB 393b12 e respetivo cabo (*Figura 119*);
- um martelo instrumentado PCB 086D05 e respetivo cabo (*Figura 120*);

- um computador com Software Labview: Sonic Acquire e Sonic Analyzer;
- uma placa de aquisição NI USB-4431 da National Instruments (**Figura 121**);
- fita métrica, para medir a espessura dos elementos nos locais a estudar;



Specifications	SI
Sensitivity ( $\pm 10\%$ )	1019.4 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Measurement Range	4.9 m/s <sup>2</sup> pk
Frequency Range ( $\pm 5\%$ )	0.15 to 1000 Hz
Frequency Range ( $\pm 10\%$ )	0.10 to 2000 Hz
Frequency Range ( $\pm 3$ dB)	0.05 to 4000 Hz
Resonant Frequency	$\geq 10000$ Hz
Phase Response ( $\pm 5^\circ$ )	1 to 1000 Hz
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.00008 m/s <sup>2</sup> rms
Non-Linearity	$\leq 1\%$
Transverse Sensitivity	$\leq 7.0\%$

**Figura 119-** Acelerómetro PCB 393b12 e respectivas especificações principais. Fonte: <http://www.pcb.com/products.aspx?m=393B12>



Specifications	SI
Sensitivity ( $\pm 15\%$ )	0.23 mV/N
Measurement Range	$\pm 22240$ N pk
Resonant Frequency	$\geq 22$ kHz
Non-Linearity	$\leq 1\%$

**Figura 120-** Martelo instrumentado PCB 086D05 e respectivas especificações principais. Fonte: <http://www.pcb.com/products.aspx?m=086D05>

#### Analog Input

Input channels	4
NI USB-4431	1 BNC per channel
Input connector	24 bits
ADC resolution	Delta-sigma
ADC type	Simultaneous
Sampling mode	1 kS/s to 102.4 kS/s in
Sample rates ( $f_s$ )	349.2 $\mu$ S/s increments
Sample rate accuracy	$\pm 100$ ppm max
Input range	
NI USB-4431	$\pm 10$ V <sub>pk</sub>
Input protection	$\pm 60$ V max



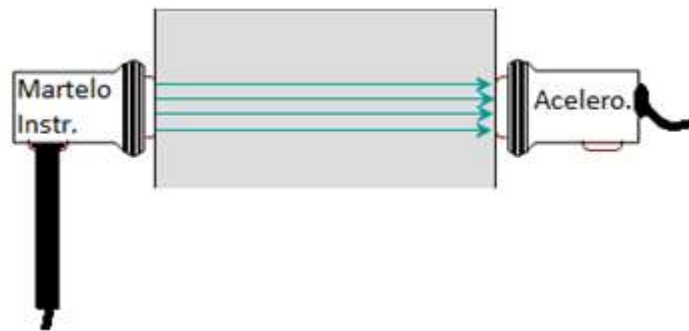
#### Analog Output

Output channels	1
AO signal connection	BNC
AO frequency range	DC to 43.5 kHz
AO frequency accuracy	$\pm 100$ ppm max
DAC resolution	24 bits
DAC type	Delta-sigma
Output signal range	$\pm 3.5$ V <sub>pk</sub>
Output coupling	DC
Short circuit protection	Indefinite
Minimum working load	1 k $\Omega$
Output impedance	50 $\Omega$

**Figura 121-** Placa de aquisição NI USB-4431 da National Instruments e respectivas especificações de entrada e saída de sinal. Fonte: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/206676>

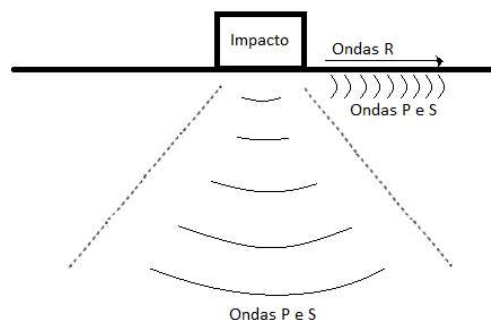


Para a realização dos ensaios sônicos diretos, após a montagem dos equipamentos e configuração/calibração do acelerómetro e martelo instrumentado, o emissor e recetor devem ser colocados em pontos de superfícies opostas e na perpendicular a superfície do elemento a ser ensaiado (**Figura 122**). A execução de uma leitura começa no momento em que o martelo através de um batimento cria um impulso e termina quando o acelerómetro, após várias ondas recebidas, estabelece novamente o repouso.



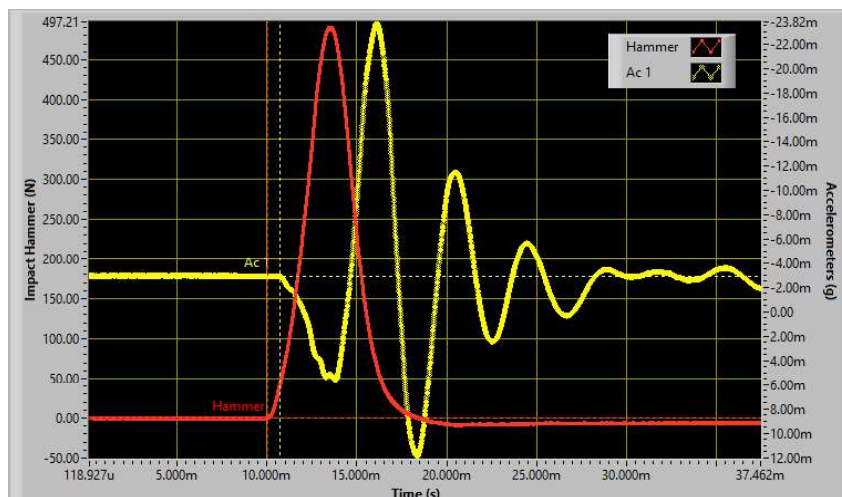
**Figura 122-** Esquema de execução de um ensaio sónico direto.

Um impacto do martelo instrumentado transmite à superfície ondas planares, P e S segundo a direção axial, e as ondas de superfície, R, P e S segundo a direção radial. Na **Figura 123** é possível verificar a sua propagação num meio solido após um impulso. Porém, apesar da existência destes tipos de ondas, nos ensaios diretos apenas interessa o estudo das ondas P, ondas longitudinais ou de compressão, pois as ondas R apenas se propagam na camada superficial do elemento, não percorrendo transversalmente a este (Guimarães, 2009).



**Figura 123-** Propagação das ondas P, S e R num meio solido.

Para cada impacto executado o software *Sonic Acquire* programado na linguagem *Labview* guarda um ficheiro de dados que depois é analisado no software *Sonic Analyzer*, também em *LabView* onde é representada uma curva de emissão (martelo) e uma curva de receção (acelerómetro), sendo apenas necessário picar o ponto de início de impacto e o ponto de primeira receção da onda, possibilitando a deteção da velocidade de propagação das ondas P. Para cada ponto de ensaio foram realizados um mínimo de dez impactos, de maneira a tornar os resultados mais consistentes. Na **Figura 124** representam-se um exemplo das curvas traçadas pelo software *Sonic Analyzer* e os respetivos pontos picados para a obtenção da velocidade de propagação pretendida. A curva vermelha representa o impulso gerado pelo martelo e a curva amarela mostra a onda recebida no acelerómetro. A linha vertical tracejada de cor vermelha representa a posição onde o impacto foi iniciado. A linha vertical de cor amarela marca o ponto onde se começa a receber as ondas geradas pelo martelo do outro lado do elemento em causa.



**Figura 124-** Exemplo de gráfico recolhido num ensaio sónico direto de uma pedra através do *Sonic Analyzer*.

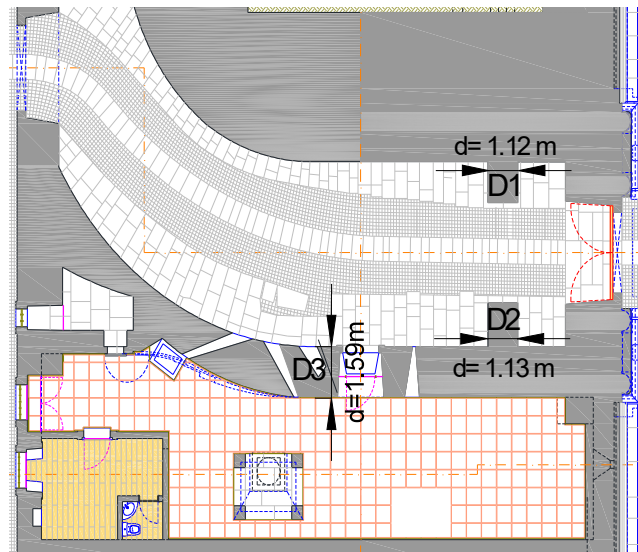
Sabendo a diferença de tempo entre a partida e a chegada da onda obtêm-se o intervalo de tempo  $\Delta_T$  que demora a onda P a percorrer a distância, neste caso a espessura do elemento ( $e$ ), entre o martelo e o acelerómetro, permitindo, assim, o cálculo da velocidade da onda  $V_p$  pela expressão:

$$V_p = \frac{e}{\Delta_T} \quad (5.1).$$

### Ensaio sónicos diretos na porta magistral de São Francisco

Na porta magistral de São Francisco foram realizados ensaios sónicos diretos em três locais pertencentes ao túnel da porta, conforme está representado na **Figura 125**. Os ensaios dos locais

D1 e D2 foram realizados em pedra, enquanto o ensaio no local D3 foi executado numa parede de alvenaria.



**Figura 125-** Localização dos ensaios sônicos diretos na porta magistral de São Francisco e respectivas distâncias consideradas no cálculo das velocidades.

Após a utilização do software *Sonic Analyzer* e aplicação da expressão 5.1, obtiveram-se os resultados representados na **Tabela 1** para os respectivos locais de ensaio.

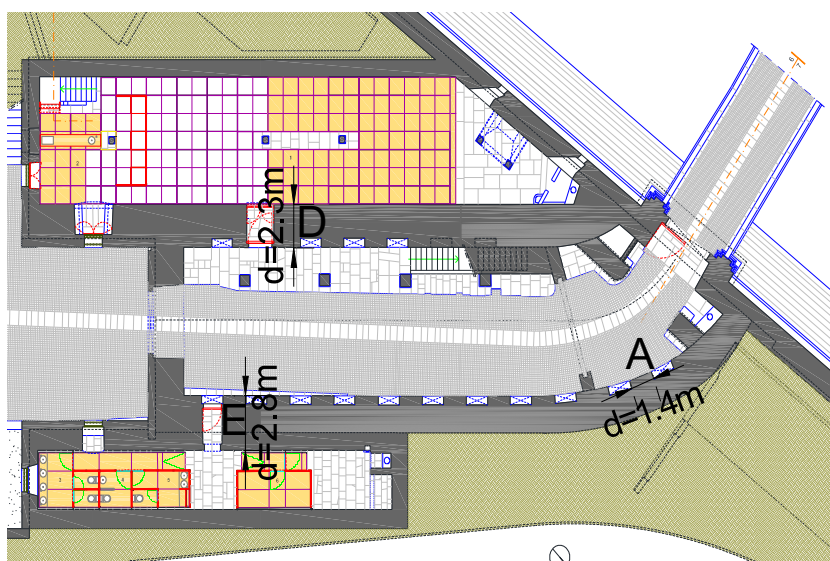
**Tabela 1-** Resultados dos ensaios sônicos diretos na porta magistral de São Francisco.

Local	Distância (cm)	Velocidade ondas P (m/s)	Cv (%)
D1 (ensaio na pedra)	113	2065	2.9
D2 (ensaio na pedra)	112	2243	4.1
D3 (ensaio na parede de alvenaria)	133	1487	4.1

Analisando a **Tabela 1** verifica-se a existência de velocidade de propagação das ondas P para a alvenaria cerca de 1500 m/s e para o granito na gama dos 2000-2250 m/s. Tratam-se de valores de velocidades plausível para parede de alvenaria de granito, comparativamente aos resultados obtidos num caso de estudo de um edifício construído no início do século XX, situado na Rua de António Carneiro, na cidade do Porto em que se obteve velocidades das ondas P para este tipo de ensaios aproximadas dos 2000 m/s (GUIMARÃES, 2009). Relativamente as velocidades obtidas para a pedra, revelaram se bastante baixas face gama de velocidades normalmente observáveis, 3500-5500 m/s (Bastos, Marques, & Sossai, 2006), porém, o estado elevado de degradação aparente constatado visualmente, leva-nos a aceitar esta gama de valores.

### Ensaio sónico direto na porta magistral de Santo António

Na porta magistral de São Francisco foram realizados ensaios sónicos diretos em três locais pertencentes ao túnel da porta, conforme está representado na **Figura 126**. Os ensaios do local D e E foram realizados em paredes de alvenaria em pedra, constituídas por um paramento com materiais mais deteriorados e outro paramento com materiais menos deteriorados. Relativamente ao local A, foi realizado numa parede de alvenaria bastante degradada adjacente a duas reentrâncias existentes na parede. Os resultados encontram-se apresentados na **Tabela 2**.



**Figura 126-** Localização dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de Santo António e respetivas distâncias consideradas no cálculo das velocidades.

**Tabela 2-** Resultados dos ensaios sónicos diretos na porta magistral de Santo António.

Local	Distância (cm)	Velocidade ondas P (m/s)	Cv (%)
Ponto A (ensaio em parede de alvenaria)	140	1292	4.0
Ponto D (ensaio em parede de alvenaria)	230	1455	3.9
Ponto E (ensaio em parede de alvenaria)	280	1255	2.5

Analisando a **Tabela 2** verifica-se a existência de velocidades de propagação das ondas P para a alvenaria na gama dos 1250-1460 m/s. Esta gama de valores é muito semelhante ao da porta magistral de São Francisco, eram esperados valores de velocidade de propagação a onda P da mesma ordem de grandeza.

### 5.2.2. Ensaaios sínicos indiretos

Nesta secção são apresentados ensaios realizados *in situ* no interior dos túneis e cobertura das duas portas magistrais da Fortaleza de Almeida, de maneira a conhecer as velocidades de propagação das ondas P e R para *a posteriori* estimar o módulo de elasticidade na pedra e na alvenaria existente. Neste método o emissor e o recetor são colocados no mesmo plano, como podemos observar na **Figura 127**.



**Figura 127-** Execução de ensaio sínico indireto em parede de alvenaria.

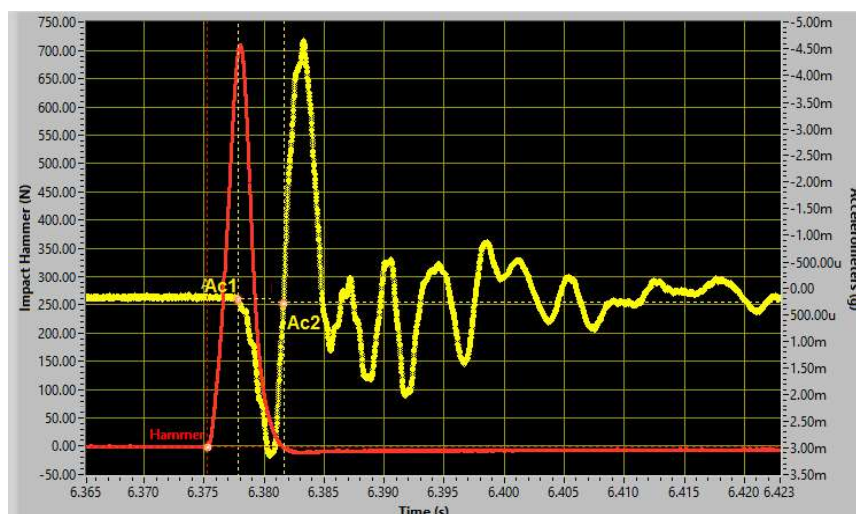
Um impacto na superfície de um material transmite diversos tipos de ondas, como as ondas planares, P e S, na direção axial, e as ondas de superfície R, incluindo as ondas P e S, na direção radial, conforme ilustrado anteriormente na **Figura 123**. A partir deste batimento é possível a determinação das velocidades da onda P e R registadas pelo acelerómetro.

#### Equipamento e Procedimento

O equipamento utilizado é o mesmo utilizado para os ensaios sínicos diretos e foi disponibilizado também pelo LEST (Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho).

O procedimento para a realização de ensaios sínicos indiretos é semelhante ao dos ensaios sínicos diretos, com a diferença de que o emissor e o recetor são colocados em pontos da mesma superfície. Nos ensaios indiretos são captadas pelo recetor as ondas P, de compressão e as ondas R de superfície. No computador, através do software *Sonic Analyzer*, são representadas as respostas do ensaio na forma de duas curvas, a de emissão e a de receção, tal como era representada nos ensaios diretos, com a diferença da possibilidade de identificação na curva de

receção a chegada das ondas P e R, como se pode verificar na **Figura 128** no ponto Ac1 e Ac2, respetivamente.



**Figura 128-** Exemplo de gráfico recolhido num ensaio sónico indireto de uma pedra através do *Sonic Analyser V5*.

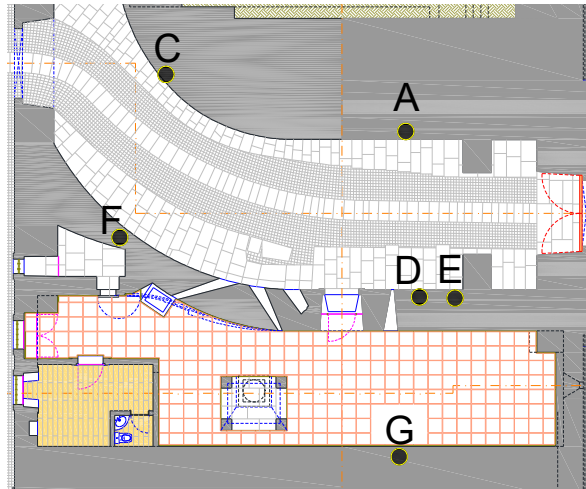
O ponto Ac1 marca a chegada das onda P, isto porque estas são as ondas de maior velocidade, logo admite-se que são as primeiras a ser recebidas pelo acelerómetro. O ponto Ac2, ponto onde se verifica um crescimento repentino da amplitude, representa a chegada das ondas R, de menor velocidade quando comparadas com as ondas P.

Neste tipo de ensaio é importante ter em conta a proximidade entre o recetor e emissor, pois no caso de estarem próximos em demasia, é provável que as ondas perceptíveis pelo recetor e emissor sejam apenas as ondas R. A velocidade das ondas R foi obtida através da expressão 5.1 mencionada anteriormente, tomando em consideração as distâncias entre o emissor e o recetor.

### Ensaio sónicos indiretos na porta magistral de São Francisco

Na porta magistral de São Francisco foram realizados ensaios sónicos indiretos em seis locais pertencentes ao interior da porta, conforme está representado na **Figura 129**. Os ensaios indiretos na pedra foram realizados nos locais A, C, D e E. Para a realização dos ensaios indiretos na alvenaria escolheram-se os locais A, F e G, em que o ponto A e F pertencem a alvenarias aparentemente degradadas e o ponto G pertence a uma parede de alvenaria restaurada em 1995-1997. Após a utilização do software *Sonic Analyser* e aplicação da expressão 5.1, obtiveram-se os resultados representados na **Tabela 3** e **Tabela 4**, para os respetivos locais de ensaio.





**Figura 129-** Localização dos ensaios sônicos indiretos na porta magistral de São Francisco.

**Tabela 3-** Resultados dos ensaios sônicos indiretos realizados em pedra do interior porta magistral de São Francisco.

Local	Distância (cm)	Velocidade P (m/s)	C. v. (%) onda P	Velocidade R (m/s)	C. v. (%) onda R
Ponto A	100	1986	5.6	987	6.0
Ponto C	70	1828	3.9	906	3.8
Ponto D	90	1819	2.2	854	4.2
Ponto E	130	1772	4.6	975	7.0

**Tabela 4 -** Resultados dos ensaios sônicos indiretos realizados em alvenaria da porta magistral de São Francisco.

Local	Distância (cm)	Velocidade P (m/s)	C. v.(%) onda P	Velocidade R (m/s)	C. v. (%) onda R
Ponto A (alvenaria degradada)	70	1517	4.2	778	6.3
Ponto F (alvenaria degradada)	100	1432	2.4	738	5.6
Ponto G (alvenaria restaurada)	90	1847	9.7	870	6.5

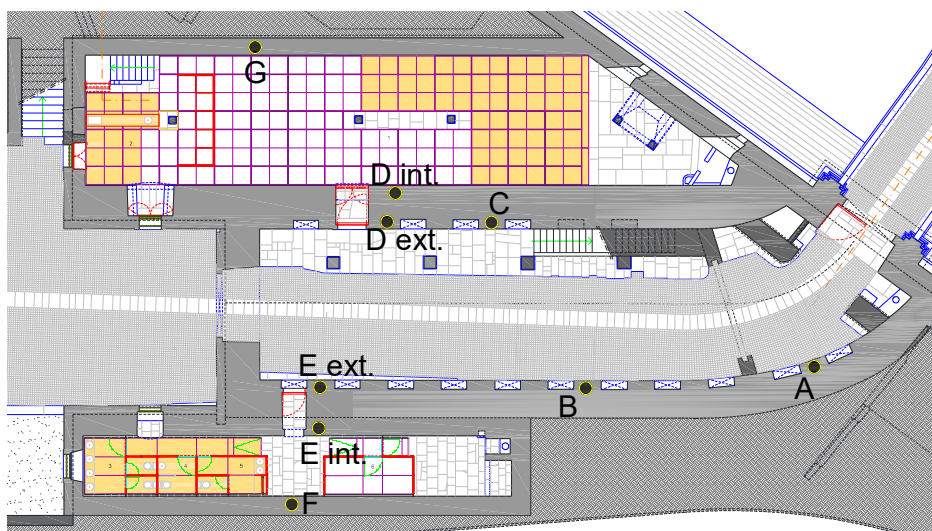
Analisando os resultados dos ensaios sônicos indiretos realizados em pedra do interior porta magistral de São Francisco, é possível verificar uma gama de valores de velocidade das ondas P de 1770-1990 m/s e uma gama de valores de velocidade das ondas R de 850-990 m/s. Estes intervalos de valores são bastante inferiores ao esperado para uma pedra, porém já existem casos de estudo em que se obtiveram esta gama de valores para as velocidades, como é

o caso de um trabalho realizado numa parede de pedra de um prédio de gaia em que se obtiveram para as ondas P o valor de 1837 m/s e para as ondas R de 980 m/s (GUIMARÃES, 2009).

Nos ensaios sónicos indirectos realizados em alvenaria da porta magistral de São Francisco, verificou-se que a velocidade das ondas é ligeiramente superior na alvenaria do ponto G (alvenaria restaurada) comparativamente com os restantes pontos em que alvenaria se encontra mais degradada. Contudo, todos os valores de velocidades obtidos para alvenaria são relativamente baixos face aos valores normalmente encontrados, indiciado algum grau de deterioração da alvenaria.

### Ensaio sónicos indirectos na porta magistral de Santo António

Na porta magistral de Santo António foram realizados ensaios sónicos directos em sete locais pertencentes ao túnel da porta, de A a G conforme está representado na **Figura 130**. Em todos esses locais foram realizados ensaios indirectos na alvenaria afastados em altura, com a devida medição e marcação dos pontos de emissão e receção (**Figura 131**). Nos pontos A e F foram realizados, para além dos ensaios indirectos em alvenaria, ensaios indirectos nas pedras, pois era possível ter um afastamento razoável entre o emissor e recetor para se obterem bons resultados.



**Figura 130-** Localização dos ensaios sónicos indirectos na porta magistral de Santo António.



**Figura 131-** Execução de medição entre o ponto de emissão e receção.

Após a utilização do software Sonic Analyzer e aplicação da expressão **5.1**, obtiveram-se os resultados representados na **Tabela 5 e Tabela 6**, para os respetivos locais de ensaio.

**Tabela 5-** Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em pedra do interior da porta magistral de Santo António.

Local	Distância (cm)	Velocidade P (m/s)	C. v. (%) onda P	Velocidade R (m/s)	C. v. (%) onda R
Ponto A	110	2002	5.4	980	4.8
Ponto F	80	2258	6.1	1168	7.8

**Tabela 6-** Resultados dos ensaios sónicos indiretos realizados em alvenaria do interior da porta magistral de Santo António.

Local	Distância (cm)	Velocidade P (m/s)	C. v. (%) onda P	Velocidade R (m/s)	C. v. (%) onda R
Ponto A (alvenaria degradada)	128	1223	2.8	592	2.4
Ponto B (alvenaria degradada)	130	1451	4.6	656	5.1
Ponto C (alvenaria degradada)	100	1359	7.1	673	5.8
Ponto D exterior (alvenaria degradada)	90	1457	7.7	653	9.1
Ponto D interior (alvenaria restaurada)	90	1821	4.6	860	6.4
Ponto E exterior (alvenaria degradada)	90	1479	4.7	705	8.1
Ponto E interior (alvenaria restaurada)	90	1554	4.5	850	4.8
Ponto F (alvenaria restaurada)	95	1732	6.6	849	8.4
Ponto G (alvenaria restaurada)	90	1769	6.8	807	7.9

Nos ensaios sónicos indirectos realizados em pedra do interior da porta magistral de Santo António obtiveram-se velocidades de ondas P de 2000-2250 m/s e velocidades de ondas R de 980-1170 m/s. Estes intervalos são um pouco superiores aos obtidos na porta magistral de São Francisco, o que leva a suspeitar que o estado de deterioração da pedra na porta magistral de Santo António é um pouco inferior à porta de São Francisco.

Relativamente aos resultados dos ensaios sónicos indirectos realizados em alvenaria do interior da porta magistral de Santo António, para a alvenaria danificada obteve um valor médio de velocidade das ondas P de 1394 m/s e para as ondas R de 656 m/s. No caso da alvenaria restaurada adquiriu-se um valor médio de velocidade de ondas P de 1719 m/s e para as ondas R de 841 m/s. Os valores de velocidades alcançados para alvenaria degradada e para a alvenaria restaurada são muito semelhantes aos obtidos para a porta magistral de São Francisco, o que demonstra alguma semelhança a nível do estado de conservação da alvenaria.

### 5.2.3. Determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez de um material sólido. Segundo a norma British Standard 1881-203, é executável o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico de um meio elástico e isotrópico de dimensões infinitas, através da relação entre as características elásticas e a velocidade de ondas ultrassónicas. A expressão seguinte representa essa relação:

$$V_P = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \times (1-2\nu)}} \quad (5.2),$$

onde,  $V_P$  é a velocidade das ondas P em m/s,  $E_d$  o módulo de elasticidade dinâmico em Pa,  $\rho$  a densidade do material em kg/m<sup>3</sup> e  $\nu$  o coeficiente de Poisson. O valor da densidade do material  $\rho$  utilizado é de 2419.43 kg/m<sup>3</sup> e foi calculado na Secção 6.2. Esta expressão deve só ser utilizada para materiais isotrópicos, no entanto, quando aplicada apenas às pedras, espera-se que os seus resultados não sejam tão divergentes. mesmo assim, deve ter-se em consideração a falta de rigor dos resultados.

Para a determinação do coeficiente de Poisson foi utilizada a seguinte expressão:

$$\frac{V_P}{V_R} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \times \frac{(1+\nu)^2}{(0.87+1.12\nu)^2}} \quad (5.3).$$

onde  $\frac{V_P}{V_R}$  representa o cociente entre as velocidades das ondas P e as ondas R e  $\nu$  o coeficiente de Poisson.

Assim sendo, foi realizado o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico para os locais utilizados nos ensaios sónicos indiretos correspondentes as duas portas magistrais.

### **Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático.**

As diferentes condições em que se realizam os ensaios estáticos e dinâmicos não permitem uma comparação direta entre eles (Guimarães, 2009). Nos ensaios estáticos, normalmente ensaios de compressão uniaxial em laboratório, são usadas baixas velocidades de deformação do material, resultando em valores para o módulo de elasticidade estático sempre inferiores ao módulo de elasticidade de ensaios dinâmicos, onde as velocidades de deformação são muito mais elevadas (Guimarães, 2009). Por essa razão, é normal estimar o módulo de deformabilidade estático  $E_s$  dos materiais através de uma aproximação ou redução do módulo de elasticidade dinâmico  $E_d$  medido experimentalmente (Guimarães, 2009). Adicionalmente, o valor estimado para o módulo de elasticidade dos materiais foi obtido apenas à superfície do material, i.e. obtido nos panos exteriores das paredes de alvenaria e não considerando a morfologia real da parede, que apresenta um núcleo central com menores propriedades mecânicas. Considerando a morfologia real das paredes, é plausível que o módulo de elasticidade global seja menor do que o obtido nos panos exteriores. Apesar de não haver ainda uma base científica comprovada, optou-se por considerar para as paredes de alvenaria o módulo de elasticidade estático  $E_s$  trinta por cento menor que o módulo de elasticidade dinâmico  $E_d$ . No caso das pedras considerou-se uma redução de dez por cento entre o módulo de elasticidade dinâmico  $E_d$  e o módulo de elasticidade estático  $E_s$ . Esta opção teve também em conta trabalhos realizados onde se aplicaram de forma empírica a mesma relação entre módulos de elasticidade (Almeida & Hanai, 2008).

### **Resultados módulo de elasticidade porta magistral de São Francisco**

Na **Tabela 7** e **Tabela 8** estão resultados do cálculo do módulo de elasticidade da pedra e da alvenaria da porta magistral de São Francisco, respetivamente.

**Tabela 7-** Resultados do módulo de elasticidade da pedra do interior da porta magistral de São Francisco.

Local de ensaio	$\frac{V_P}{V_R}$	v	$E_d$ (Gpa)	$E_s$ (Gpa)
Ponto A	2.01	0.30	7.12	6.41
Ponto C	2.02	0.30	6.00	5.40
Ponto D	2.13	0.33	5.41	4.87
Ponto E	1.82	0.22	6.70	6.03

**Tabela 8-** Resultados do módulo de elasticidade da alvenaria do interior da porta magistral de São Francisco.

Local de ensaio	$\frac{V_P}{V_R}$	$\nu$	$E_d$ (Gpa)	$E_s$ (Gpa)
Ponto A (alvenaria degradada)	1.95	0.28	4.37	3.06
Ponto F (alvenaria degradada)	1.94	0.26	4.07	2.85
Ponto G (alvenaria restaurada)	2.14	0.41	5.54	3.88

Para a pedra da porta magistral e São Francisco obteve-se o valor médio de módulo elasticidade dinâmico de 6.3 GPa, refletindo-se num valor médio para o módulo de elasticidade estático de 5.67 GPa. No caso da alvenaria adquiriu-se o valor médio para o módulo de elasticidade dinâmico de 4.66 GPa e para o módulo de elasticidade estático de 3.26 GPa. Tal como era esperado, o valor dos módulos de elasticidade é um pouco maior na alvenaria restaurada comparativamente a alvenaria degradada. Porém todos os módulos de elasticidade determinados para esta porta magistral são bastante baixos, visto isto, uma vez que se tratam de ensaios em campo é possível a existência de alguns erros no levantamento de dados.

### Resultados módulo de elasticidade porta magistral de Santo António

Na **Tabela 9** e

**Tabela 10** estão resultados do cálculo do módulo de elasticidade da pedra e da alvenaria da porta magistral de Santo António, respetivamente.

**Tabela 9-** Resultados do módulo de elasticidade da pedra do interior da porta magistral de Santo António.

Local de ensaio	$\frac{V_P}{V_R}$	$\nu$	$E_d$ (GPa)	$E_s$ (GPa)
Ponto A	2.04	0.31	7.06	6.35
Ponto F	1.93	0.27	9.87	8.88

Para a pedra da porta magistral e Santo António obteve-se o valor médio de módulo elasticidade dinâmico de 8.47 GPa, refletindo-se num valor médio para o módulo de elasticidade dinâmico de 7.62 GPa.



**Tabela 10-** Resultados do módulo de elasticidade da alvenaria do interior da porta magistral de Santo António.

Local de ensaio	$\frac{V_p}{V_r}$	$\nu$	$E_d$ (GPa)	$E_s$ (GPa)
Ponto A (alvenaria degradada)	2.06	0.31	2.59	1.82
Ponto B (alvenaria degradada)	2.21	0.35	3.22	2.25
Ponto C (alvenaria degradada)	2.10	0.32	3.67	2.57
Ponto D exterior (alvenaria degradada)	2.23	0.35	3.19	2.23
Ponto D interior (alvenaria restaurada)	2.02	0.30	3.31	2.32
Ponto E exterior (alvenaria degradada)	1.83	0.22	5.09	3.56
Ponto E interior (alvenaria restaurada)	2.04	0.31	5.28	3.7
Ponto F (alvenaria restaurada)	2.12	0.33	5.46	3.82
Ponto G (alvenaria restaurada)	2.19	0.34	4.86	3.4

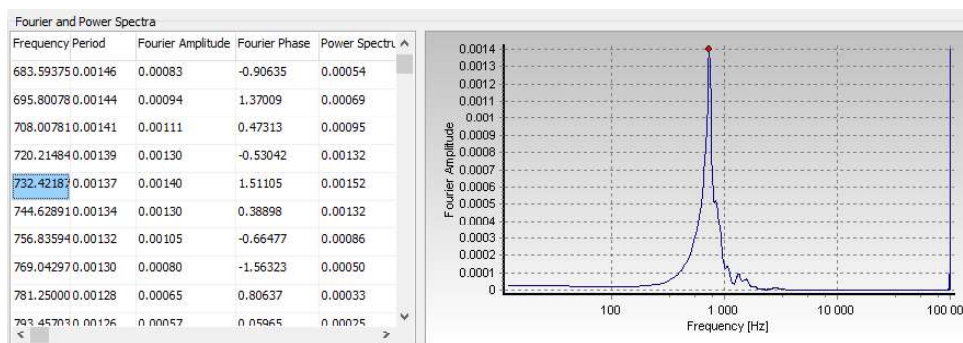
No caso da alvenaria degradada adquiriu-se o valor médio para o módulo de elasticidade dinâmico igual a 3.69 GPa e para o módulo de elasticidade estático de 2.58 GPa. Para a alvenaria restaurada foi obtido para o módulo de elasticidade dinâmico de 5.2 GPa e para o módulo de elasticidade estático de 3.64 GPa. Os módulos de elasticidade determinados para esta porta magistral são ligeiramente superiores aos determinados para a porta magistral de São Francisco, principalmente no caso da pedra, contudo encontram-se ainda numa gama inferior ao que seria de esperar para estes materiais.

### 5.3. Ensaaios de impacto-eco

Os ensaios de impacto-eco foram realizados de forma a determinar as espessuras dos elementos estruturais, principalmente paredes e abobadas, e comparar os valores com os obtidos nos ensaios de georadar. As medições foram executadas nas duas portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

Para cada local a estudar executaram-se dez impactos, de maneira a obter o máximo de precisão no ensaio, embora por vezes nem todos os sinais dos dez batimentos foram possíveis de utilizar. Após levantamento dos dados no local procedeu-se ao seu tratamento com auxílio do programa *SeismoSignal* da *SeismoSoft*, de onde se retiraram as frequências dos picos dos espectros de

*Fourier*. Na **Figura 132** está representado um exemplo de espectro de Fourier retirado do programa referido anteriormente, bem como a sinalização de um pico.



**Figura 132-** Exemplo de espectro de Fourier com a marcação de um dos picos.

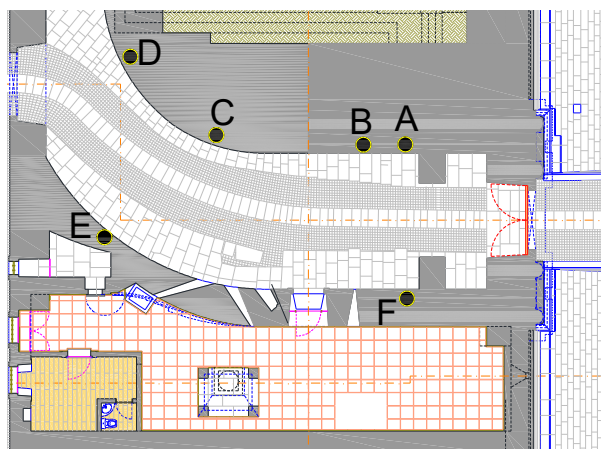
A partir das frequências obtidas é possível determinar a espessura do elemento estudado, através da seguinte expressão:

$$V_p = 2df \Leftrightarrow d = \frac{V_p}{2f} \quad (5.4),$$

onde  $V_p$  corresponde à velocidade da onda P,  $d$  é a espessura do material e  $f$  corresponde à frequência do sinal gravado. Este processo de tratamento de dados foi elaborado para todos os ensaios impacto eco.

### 5.3.1. Ensaios impacto-eco na porta magistral de São Francisco

Na porta magistral de São Francisco foram realizados ensaios impacto-eco em seis locais pertencentes as paredes do túnel principal da porta, localizados em planta segundo a **Figura 133**.



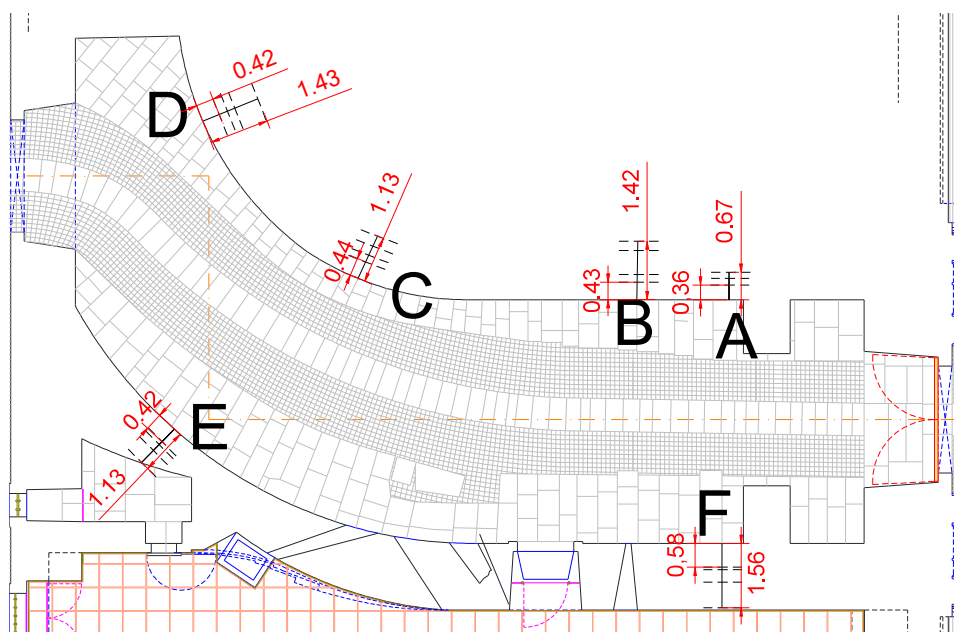
**Figura 133-** Planta de localização dos ensaios impacto-eco das paredes do túnel principal da porta de São Francisco.

O valor de velocidade de onda P utilizado para o cálculo das distâncias na porta de São Francisco foi de 1486.9 m/s, valor obtido num ensaio sónico direto em alvenaria de uma parede pertencente ao posto de turismo, ensaio anteriormente denominado por D3 na secção dos ensaios sónicos diretos da referida porta.

Na **Tabela 11** estão representadas as médias das frequências para cada pico, relativas aos 10 impactos, assim como as distâncias medidas a partir da face onde foram realizados os ensaios. De maneira a facilitar um pouco a discussão dos resultados ilustrou-se na **Figura 134** as distâncias obtidas, dando especial relevância ao primeiro e último pico de cada ensaio.

**Tabela 11-** Valores dos picos das frequências e distância aos elementos.

		Frequência média dos ensaios (Hz)	Distância (m)
<b>Local A</b>	Pico 1	1107.78	0.67
	Pico 2	1452.63	0.52
	Pico 3	2042.06	0.36
<b>Local B</b>	Pico 1	524.90	1.42
	Pico 2	620.24	1.20
	Pico 3	1221.96	0.61
	Pico 4	1734.62	0.43
<b>Local C</b>	Pico 1	659.18	1.13
	Pico 2	867.919	0.86
	Pico 3	1206.46	0.62
	Pico 4	1715.08	0.44
<b>Local D</b>	Pico 1	518.81	1.43
	Pico 2	898.44	0.83
	Pico 3	1159.67	0.64
	Pico 4	1763.92	0.42
<b>Local E</b>	Pico 1	659.18	1.13
	Pico 2	1032.36	0.72
	Pico 3	1419.34	0.52
	Pico 4	1757.82	0.42
<b>Local F</b>	Pico 1	476.07	1.56
	Pico 2	790.40	0.94
	Pico 3	910.50	0.82
	Pico 4	1154.43	0.64
	Pico 5	1285.81	0.58

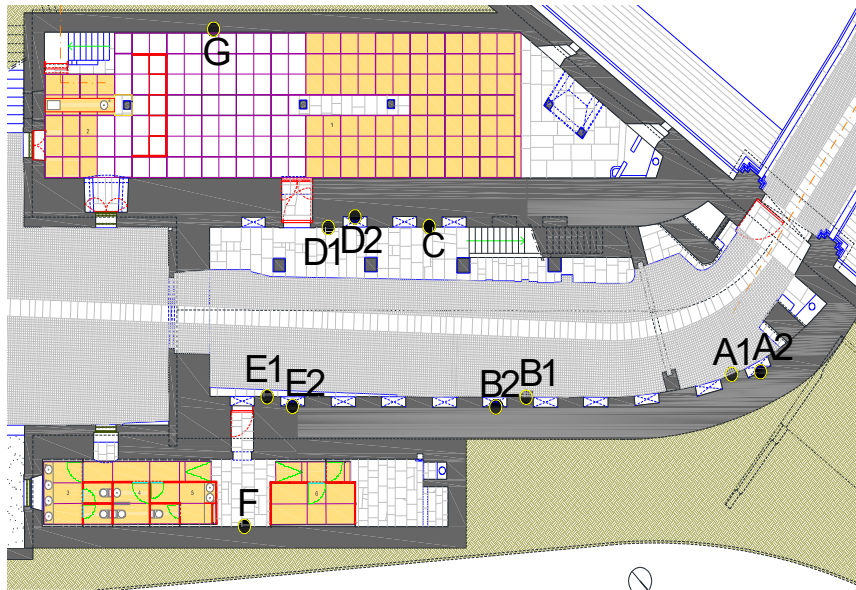


**Figura 134-** Representação dos picos obtidos em cada ensaio da porta magistral e São Francisco, com representação das distâncias (em metros) relativas ao primeiro e último pico.

Após a análise da *Tabela 11 e Figura 134* é possível afirmar a existência de um primeiro pano de alvenaria com espessura variável entre os 35 cm e os 55 cm. A sua análise permite também estimar a espessura total das paredes, revela uma espessura máxima de 1.43 m do lado direito (relativo a quem entra pela fachada principal) da porta e confirma o levantamento geométrico do lado esquerdo, realizado no capítulo quatro, demonstrando a espessura ser próxima de 1,6 m. Relativamente a constituição do núcleo da parede, os resultados obtidos não permitem afirmar nada em concreto, contudo a associação ao levantamento geométrico permite suspeitar que se trate uma parede de três panos, com enchimento mais pobre no seu interior.

### 5.3.2. Ensaio impacto-eco na porta magistral de Santo António

Na porta magistral de Santo António foram realizados ensaios impacto-eco em onze locais pertencentes as paredes do interior da porta, localizados em planta segundo a *Figura 135*.



**Figura 135-** Planta de localização dos ensaios impacto-eco nas paredes do interior principal da porta de Santo António.

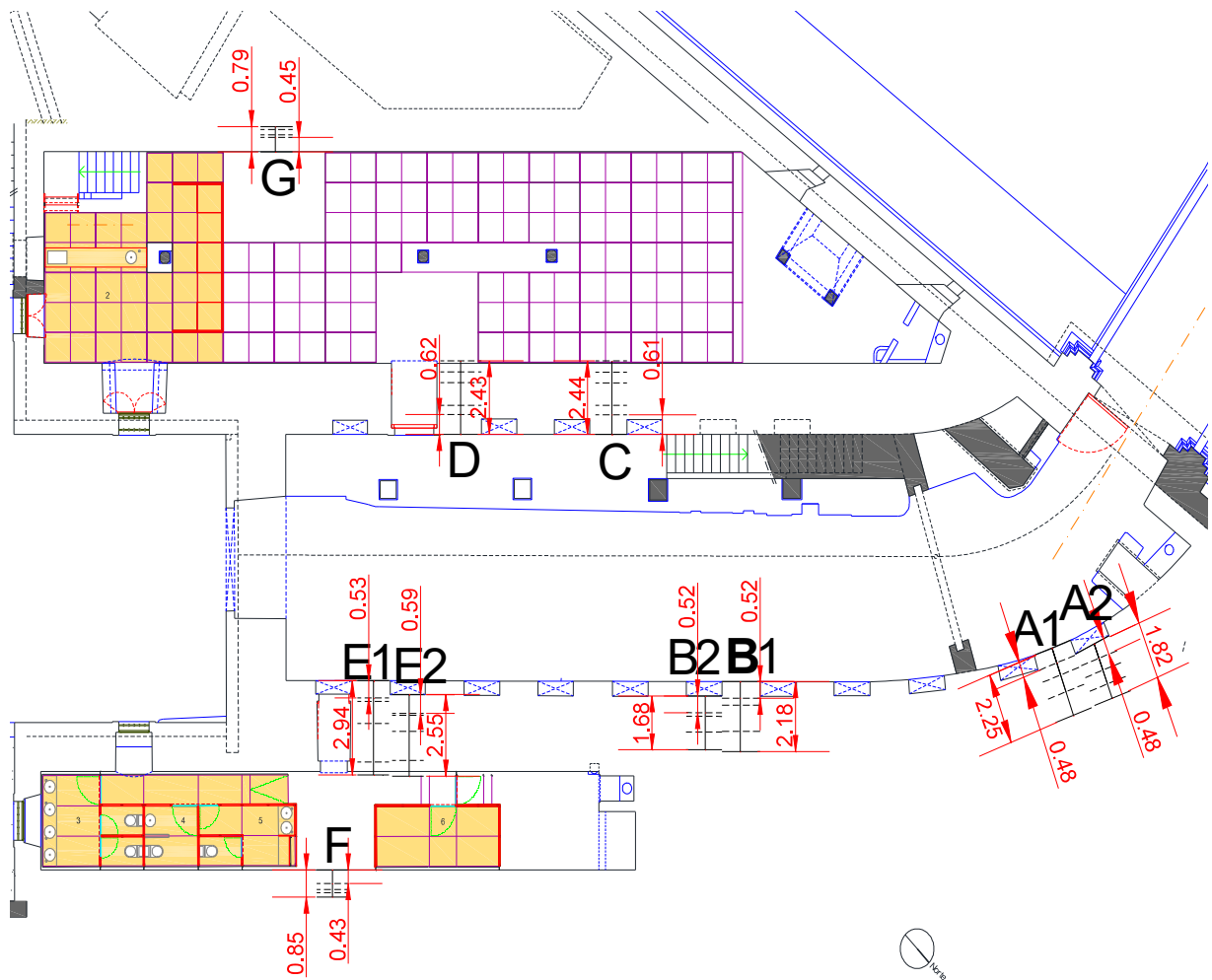
O valor de velocidade de onda P utilizado para o cálculo das distâncias na porta de Santo António foi de 1354.63 m/s, valor obtido pela média aritmética de dois ensaios sónicos diretos em alvenaria de paredes pertencentes a porta, nomeadamente o ensaio no ponto D e no ponto E na secção dos ensaios sónicos diretos da referida porta. Na **Tabela 12** estão representados os resultados para a estimativa das espessuras. De maneira a facilitar um pouco a discussão dos resultados ilustrou-se na **Figura 136** as distâncias obtidas, dando especial relevância ao primeiro e último pico de cada ensaio.

~

Tabela 12- Valores dos picos das frequências e distância aos elementos.

		Frequência média dos testes (Hz)	Distância (m)
<b>Local A1</b>	Pico 1	294.44	2.25
	Pico 2	454.13	1.46
	Pico 3	732.42	0.90
	Pico 4	1332.56	0.50
<b>Local A2</b>	Pico 1	363.47	1.82
	Pico 2	494.85	1.34
	Pico 3	755.88	0.88
	Pico 4	1379.01	0.48
<b>Local B1</b>	Pico 1	303.68	2.18
	Pico 2	426.70	1.55
	Pico 3	903.33	0.73
	Pico 4	1264.71	0.52
<b>Local B2</b>	Pico 1	394.54	1.68
	Pico 2	589.65	1.12
	Pico 3	1039.49	0.64
	Pico 4	1270.84	0.52
<b>Local C</b>	Pico 1	272.89	2.43
	Pico 2	340.22	1.95
	Pico 3	410.23	1.61
	Pico 4	727.13	0.91
	Pico 5	1075.89	0.62
<b>Local D</b>	Pico 1	271.68	2.44
	Pico 2	323.11	2.05
	Pico 3	416.47	1.59
	Pico 4	689.34	0.96
	Pico 5	1068.59	0.62
<b>Local E1</b>	Pico 1	224.93	2.94
	Pico 2	260.31	2.54
	Pico 3	496.36	1.33
	Pico 4	1015.13	0.65
	Pico 5	1239.15	0.53
<b>Local E2</b>	Pico 1	259.22	2.55
	Pico 2	320.81	2.06
	Pico 3	370.81	1.79
	Pico 4	577.19	1.15
	Pico 5	1127.71	0.59
<b>Local F</b>	Pico 1	775.82	0.85
	Pico 2	927.73	0.71
	Pico 3	1088.65	0.61
	Pico 4	1527.56	0.43
<b>Local G</b>	Pico 1	832.95	0.79
	Pico 2	939.88	0.70
	Pico 3	1250.73	0.53
	Pico 4	1487.62	0.45





**Figura 136-** Representação dos picos obtidos em cada ensaio da porta magistral e São Francisco, com representação das distâncias (em metros) relativas ao primeiro e último pico.

Após a análise da **Tabela 11 e Figura 134** pode concluir-se que as paredes pertencentes aos anexos das portas, identificadas por o ponto F e G, possuem um primeiro pano com espessura variável entre os 43 cm e os 45 cm e ainda uma espessura total de parede de alvenaria entre os 79 cm e os 86 cm. Relativamente aos pontos D e C, pertencentes à parede do lado direito (relativo a quem entra pela fachada principal), os ensaios revelaram a existência de uma primeira folha de parede a rondar os 60 cm de espessura e ainda de uma espessura aproximada de 40 cm para a primeira folha de pedras na face exposta ao interior dos anexos. Os pontos A1 e A2 e B1 e B2 demonstraram a espessura total de parede variável entre 2.25 m e 2.18 m e a primeira camada de pedras por volta dos 50 cm de espessura. Por último, os pontos E1 e E2 permitiram detetar que a primeira folha de pedras se encontra próxima dos 50 cm de espessura quer na zona saliente, quer no recuado da parede, e ainda que a espessura total da parede é aproximadamente igual a 2.9 m.

Comparando as espessuras retiradas na secção do levantamento geométrico com as espessuras obtidas através do impacto eco, é notório uma diferença no ponto E1 na ordem dos 4 cm na espessura total de uma parede de 2.9 m, dando um erro de 1.4 %, contudo face ao tipo de estrutura e aos materiais utilizados não se trata de um erro considerável.

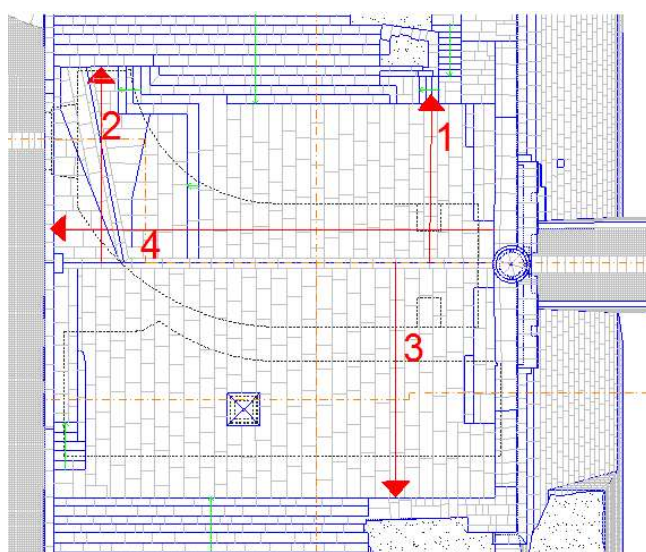
Relativamente a constituição do núcleo da parede, os resultados obtidos não permitem afirmar nada em concreto, contudo pode se suspeitar que a constituição da parede seja de 3 panos, ou seja com duas folhas exteriores com espessuras variáveis, com a existência de material britado e enchimento entre os paramentos.

## 5.4. Levantamento Georadar

O levantamento georadar foi realizado nas duas portas magistrais com a intenção de determinar/confirmar a constituição dos elementos construtivos. Neste levantamento, tendo em conta grande variância de espessura dos elementos a estudar e a presença de humidade, houve a necessidade da alternância entre as antenas de 500 e 800 MHz.

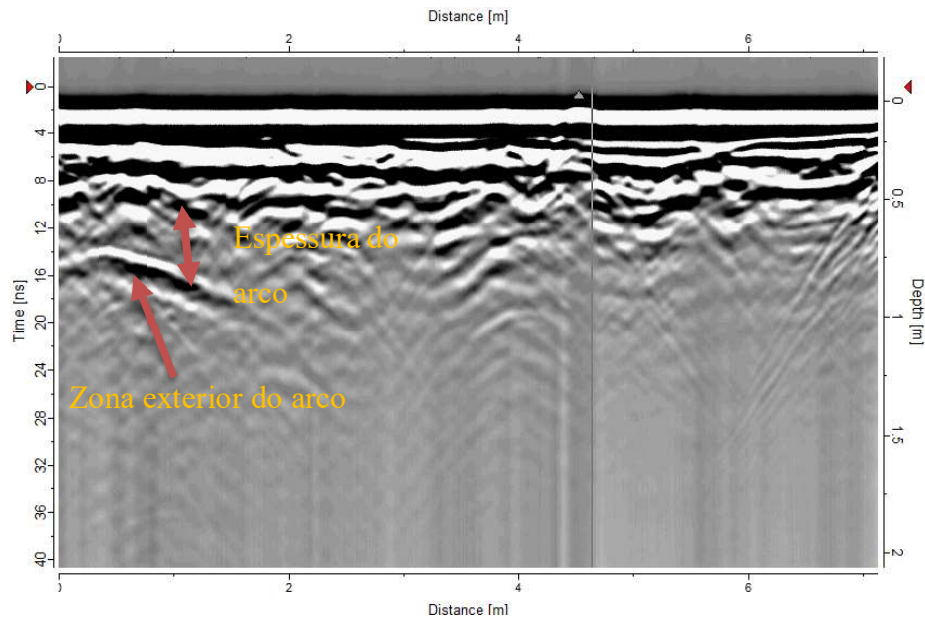
### 5.4.1. Levantamento da porta magistral de São Francisco

Na porta magistral de São Francisco foram retirados radargramas na cobertura e nas paredes do túnel. Relativamente a cobertura, foram levantados perfis longitudinais e transversais com a intenção de determinar as espessuras do arco e a sua constituição. Na **Figura 137** localizam-se os locais onde se recolheram os radargramas.



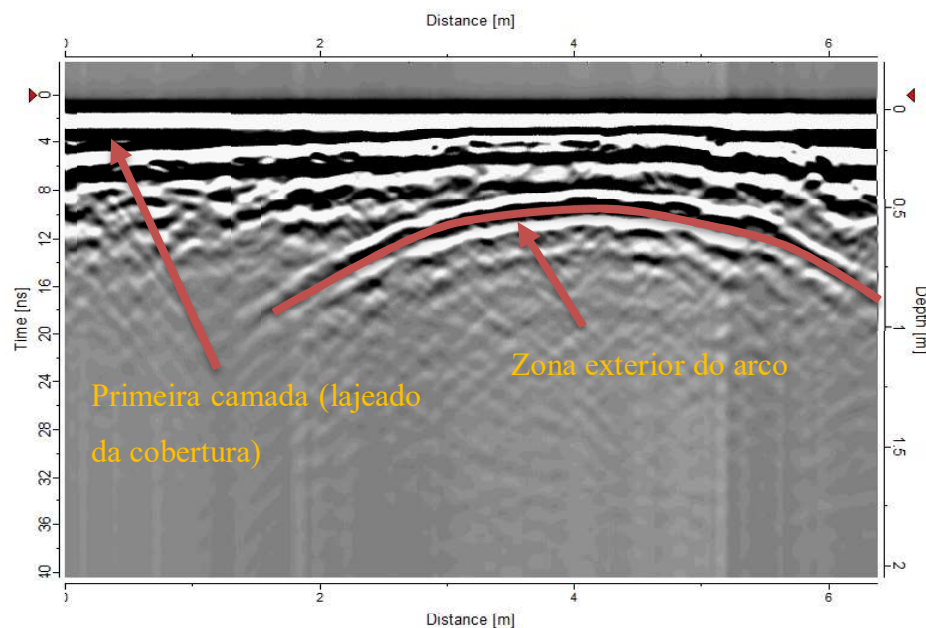
**Figura 137-** Planta de localização de radargramas a estudar na cobertura da porta.

No radargrama 1 (**Figura 138**) é possível a visualização do lado exterior do arco observável por volta de 0.8-1.0 m. A espessura do arco estrutural é visível também e possui uma espessura a variável entre 35 a 45 cm.



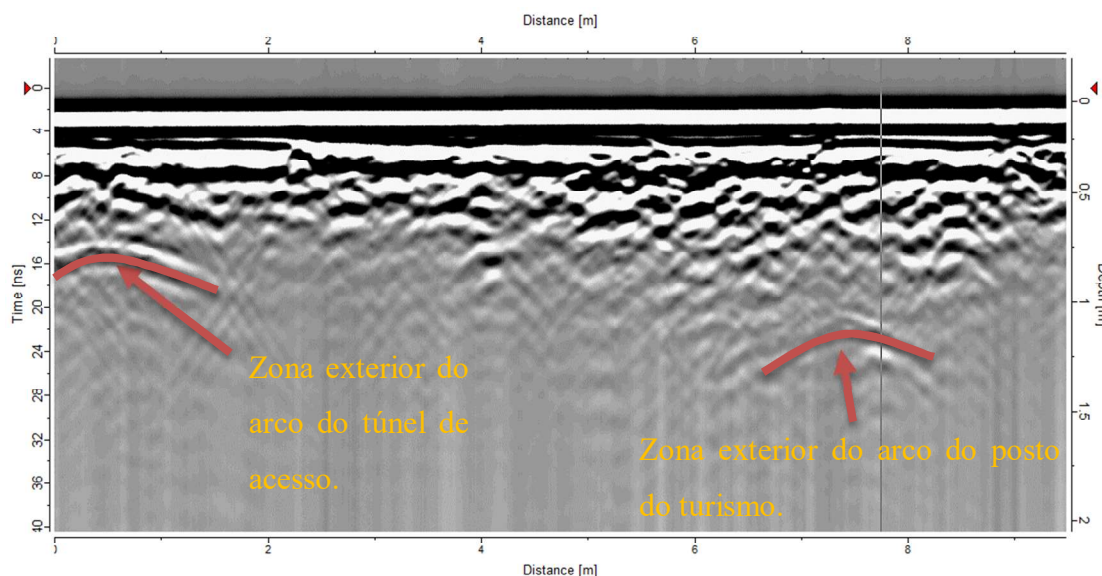
**Figura 138-** Radargrama 1.

No radargrama 2 (**Figura 139**) é possível a observação do arco pertencente ao túnel principal da porta magistral, localizado a uma profundidade variável entre os 60 cm e 85 cm. Neste radargrama o arco é visível a menor profundidade, contudo não há necessidade de suspeita desta diferença face ao último radargrama apresentado, visto que é possível verificar este desnível no interior do túnel da respetiva porta. Na **Figura 139** é visível também a existência de uma primeira camada de espessura entre os 15 e 20 cm, que corresponde ao lajeado de pedra da cobertura da porta.



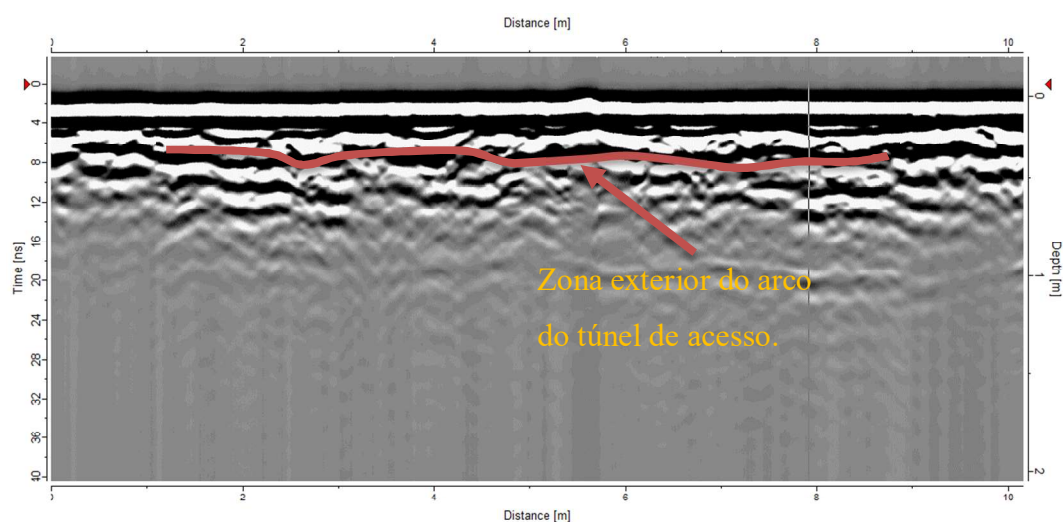
**Figura 139-** Radargrama 2.

O radargrama 3 (**Figura 140**), permitiu a deteção do arco pertencente ao túnel do acesso principal da porta, a uma profundidade entre 75 e 95 cm, e ainda visualizar o arco pertencente ao Posto de Turismo, a uma profundidade aproximada de 1.1 m.



**Figura 140-** Radargrama 3.

O radargrama 4 (**Figura 141**), perfil longitudinal (paralelo a cumieira da cobertura), permitiu, de certa forma, comprovar a espessura irregular do arco, revelando um o arco mais profundo na zona de entrada da porta que vai estreitando até à zona de saída, como já se suspeitava após a análise dos radargramas 1 e 2.

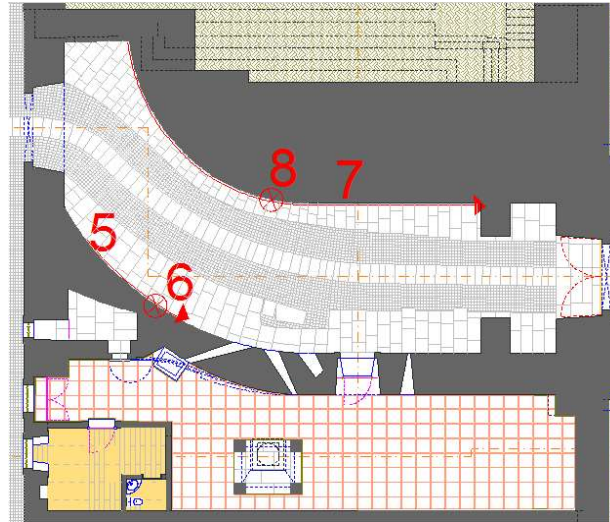


**Figura 141-** Radargrama 4.

No túnel principal de acesso ao interior da porta magistral de São Francisco foram levantados perfis verticais e horizontais com a intenção de determinar as espessuras e a morfologia das paredes. Na **Figura 142** localizam-se os sítios onde se recolheu os radargramas a analisar.

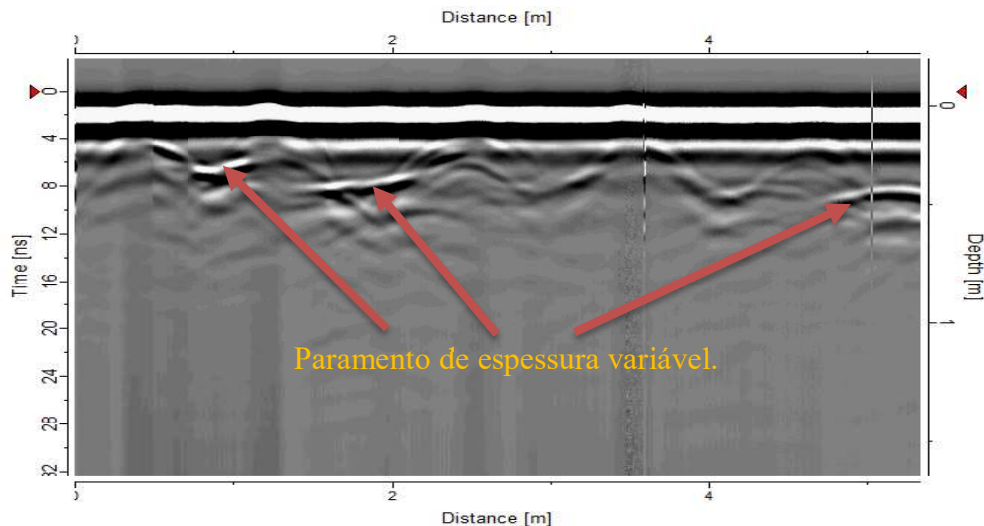


Os radargramas 6 e 8 foram retirados na vertical da parede, enquanto os radargramas 5 e 7 foram obtidos na horizontal ao longo da parede. Os radargramas verticais foram obtidos partindo de cima para baixo.



**Figura 142-** Planta de localização de radargramas estudados no interior da porta.

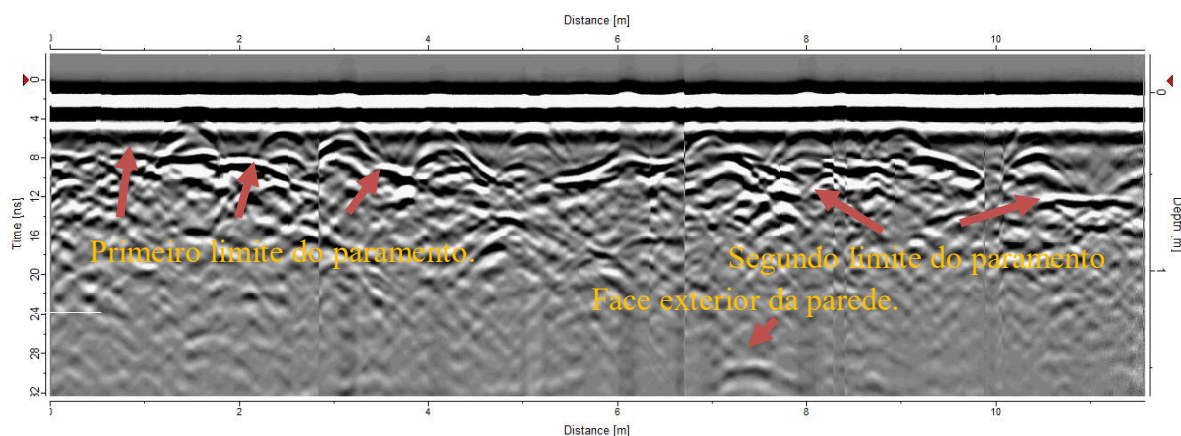
O radargrama 5 (**Figura 143**) foi realizado na horizontal ao longo da 4 fiada de alvenaria a contar do pavimento e possibilitou a detecção de um primeiro paramento com espessura variável entre os 35cm e 45 cm.



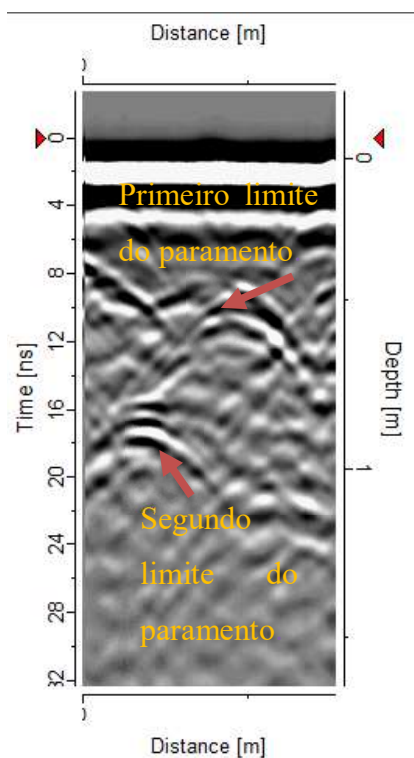
**Figura 143-** Radargrama 5.

O radargrama 6 (**Figura 144**) foi realizado na horizontal ao longo da 3 fiada de alvenaria, a 1.15 m de altura a contar do pavimento. É possível verificar a existência de um primeiro paramento com espessura variável entre os 35 cm e os 50 cm, um possível segundo limite do

paramento localizado a cerca de 80 cm de profundidade e ainda o outro lado da parede delimitado a cerca de 1.75 m de profundidade. O radargrama 7 (**Figura 145**), mostra o mesmo local, mas na perspectiva vertical, evidenciando os dois limites do paramento, não sendo possível visualizar o lado oposto da parede.



**Figura 144- Radargrama 6.**

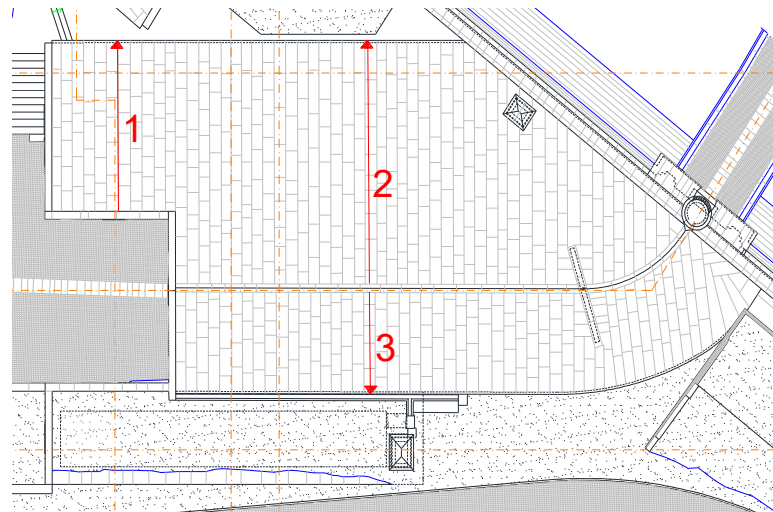


**Figura 145- Radargrama 7.**



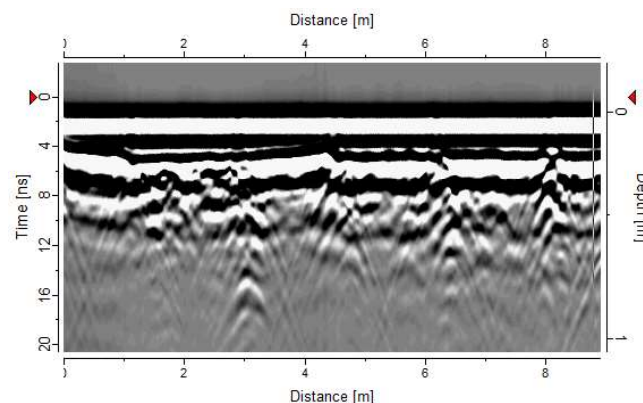
### 5.4.2. Levantamento da porta magistral de Santo António

Na porta magistral de Santo António também foram retirados radargramas na cobertura e nas paredes do túnel, num procedimento semelhante à anterior. Na cobertura foram levantados perfis longitudinais e transversais, com a intenção de determinar as espessuras do arco e a sua constituição. Uma vez que não foi possível detetar as espessuras dos arcos em nenhum dos radargramas, talvez devido há presença de humidade, optou se por apenas apresentar três radargramas de locais distintos do levantamento georadar efetuado na cobertura da porta magistral de Santo António. Na **Figura 146** localizam-se os locais onde se recolheu os radargramas a analisar.

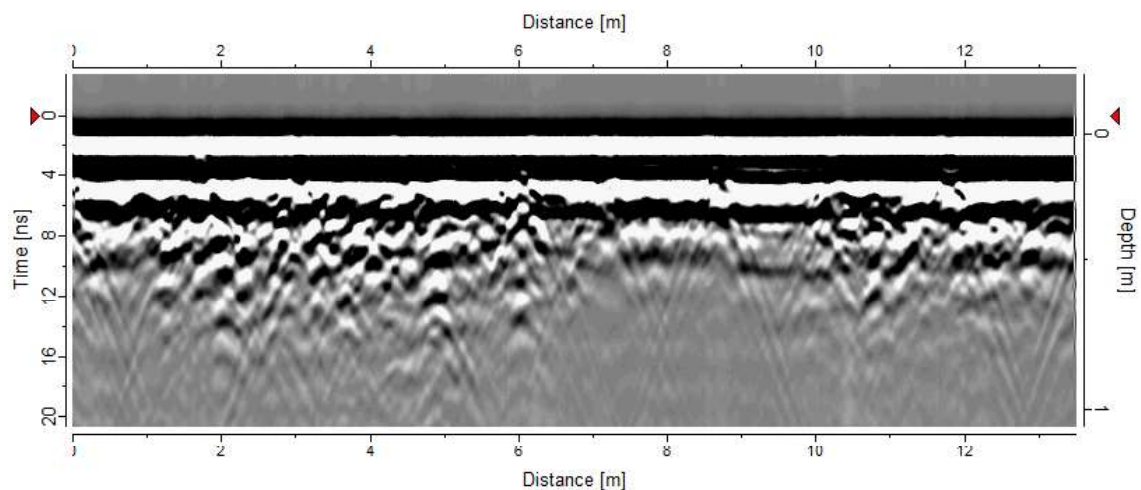


**Figura 146-** Planta de localização de radargramas a estudar na cobertura da porta.

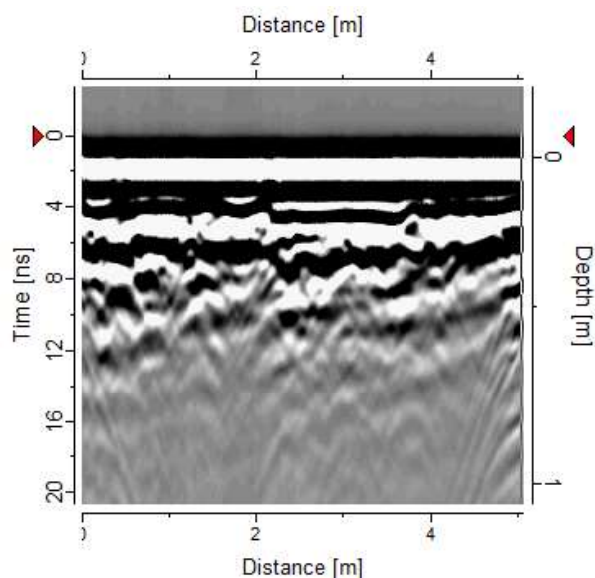
Os radargramas 1, 2 e 3, **Figura 147**, **Figura 148** e **Figura 149**, respetivamente, apenas permitiram detetar a espessura de 25-30 cm para o lajeado da cobertura da porta magistral.



**Figura 147-** Radargrama 1.

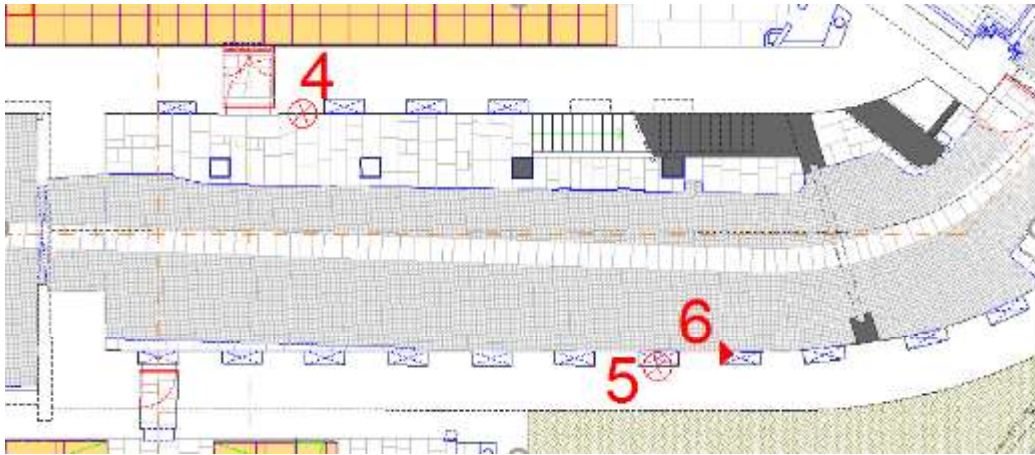


**Figura 148-** Radargrama 2.



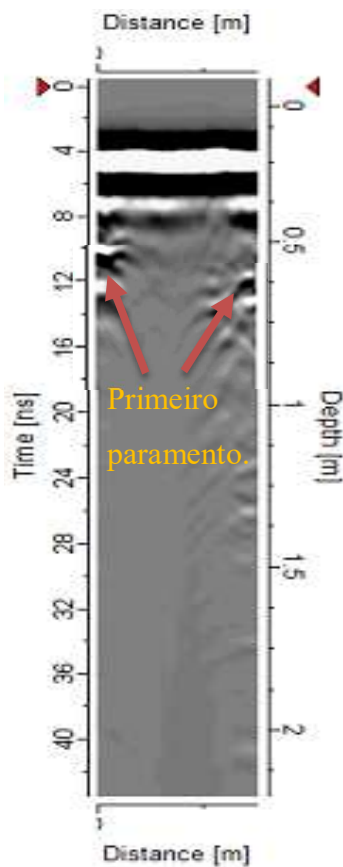
**Figura 149-** Radargrama 3.

No túnel principal de acesso ao interior da porta magistral de São Francisco também foram levantados perfis verticais e horizontais, com a intenção de determinar as espessuras e a morfologia das paredes, ver **Figura 150**. Os radargramas 4 e 5 foram retirados na vertical da parede, enquanto o radargrama 6 foi obtido na horizontal e ao longo da parede. Os radargramas verticais foram obtidos partindo de cima para baixo.

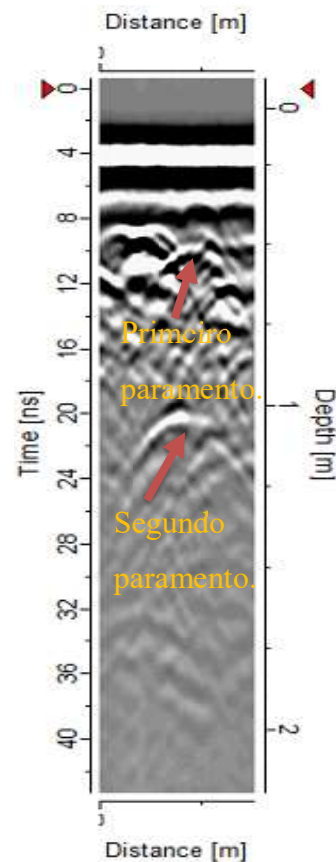


**Figura 150-** Planta de localização de radargramas estudados no interior da porta.

O radargrama 4 (**Figura 151**) realizado na vertical possibilitou a detecção de um primeiro paramento com espessura variável entre os 50 cm e 65 cm. O radargrama 5 (**Figura 152**) mostra outro radargrama realizado na perspectiva vertical, onde é visível um primeiro paramento de pedras com cerca de 50 cm e ainda um limite de outro possível paramento a cerca de 1.1 metros de profundidade em relação a face exposta da parede.

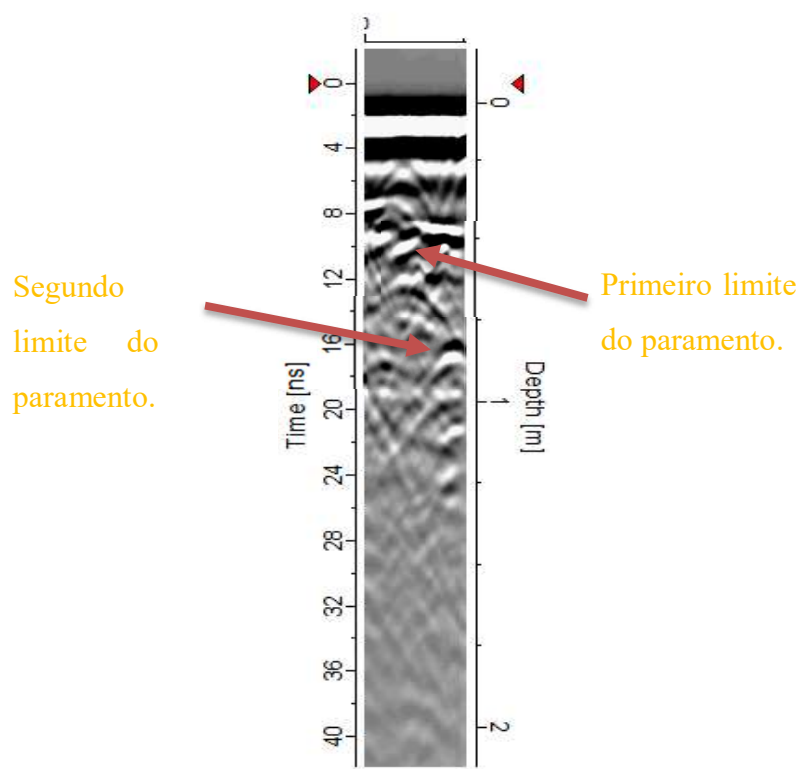


**Figura 151-** Radargrama 4.



**Figura 152-** Radargrama 5.

O radargrama 6 (**Figura 153**) foi realizado na horizontal ao longo da 4 fiada de alvenaria, a 1.3 m de altura a contar do pavimento. É possível verificar a existência de um primeiro paramento com espessura variável entre os 45 cm e os 55 cm, um possível segundo limite do paramento localizado a cerca de 75 cm de profundidade. Os radargramas retirados para a análise do túnel desta porta magistral não permitiram detetar a espessura total dos elementos estudados, esta ocorrência poderá estar relacionada com a presença de maior humidade no interior das paredes de alvenaria comparativamente com a porta magistral de São Francisco.

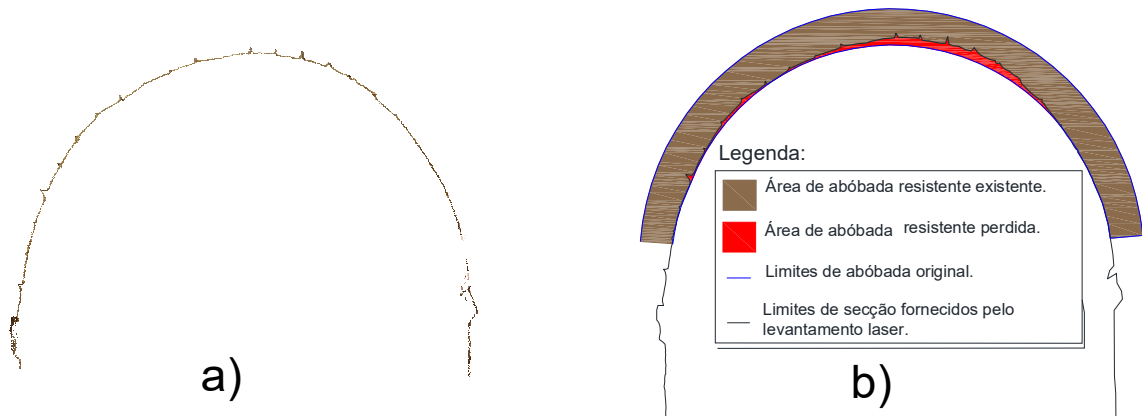


**Figura 153-** Radargrama 6.

## 5.5. Levantamento laser

O levantamento laser foi realizado nas duas portas magistrais com o principal objetivo de obter a morfologia atual do interior do arco dos túneis de acesso. Após o levantamento da nuvem de pontos nas duas portas magistrais, procedeu-se a montagem do modelo através do software *Cloudcompare*®. A montagem do modelo tridimensional permitiu seleccionar zonas dos arcos das portas com maior dano/deterioração, para uma posterior criação de cortes transversais da abóbada em arco perfeito (abóbada de berço). Para todos os cortes criados houve necessidade de traçar um arco perfeito para melhor analisar a área do arco danificado ao longo do tempo.

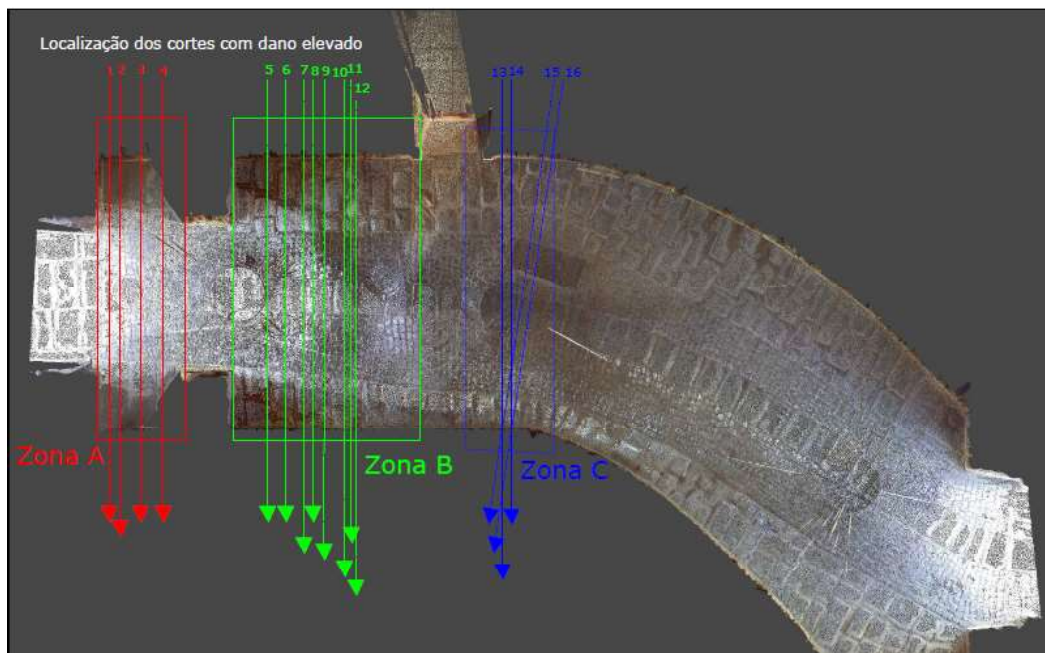
Esse processo está exemplificado na **Figura 154**. A espessura de arco utilizada foi 40 cm, valor obtido na seção Levantamento Geométrico do capítulo 4.



**Figura 154-** Exemplo de processo executado em todos os cortes transversais dos arcos selecionados. a) Nuvem de pontos original; b) Arco atual com limite do arco perfeito, bem como delimitação de áreas.

### 5.5.1. Levantamento laser na porta magistral de São Francisco

Na porta magistral de São Francisco foram detetadas três zonas com dano elevado, face a comparação com o restante do túnel. Dessas três zonas escolhidas, recolheram-se 16 cortes transversais para o cálculo do material do arco perdido ao longo do tempo. Na **Figura 155** está representada a localização dos cortes estudados.



**Figura 155-** Planta de localização dos cortes na porta magistral de São Francisco.

O processamento dos cortes para a obtenção das áreas das *Tabelas 13, 14 e 15*, estão apresentados no Anexo 5, devidamente escalados e mapeados.

**Tabela 13-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na Zona A.

	Zona A			
	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
Área secção original (m <sup>2</sup> )	3.44	3.41	3.39	3.42
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.14	3.27	2.96	2.99
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.31	0.14	0.43	0.43
Material perdido (%)	8.87	4.19	12.82	12.51
Média material perdida (%)	9.60			

**Tabela 14-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona B.

	Zona B							
	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8	Perfil 9	Perfil 10	Perfil 11	Perfil 12
Área secção original (m <sup>2</sup> )	3.44	3.42	3.43	3.46	3.41	3.45	3.40	3.44
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.06	3.08	3.19	3.25	3.10	3.16	3.05	3.15
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.37	0.34	0.24	0.21	0.31	0.29	0.35	0.29
Material perdido (%)	10.88	9.86	6.91	5.98	9.11	8.50	10.34	8.32
Média material perdido (%)	10.88							

**Tabela 15-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona C.

	Zona C			
	Perfil 13	Perfil 14	Perfil 15	Perfil 16
Área secção original (m <sup>2</sup> )	3.55	3.55	3.25	3.22
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.24	3.21	2.90	2.84
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.31	0.34	0.34	0.38
Material perdido (%)	8.71	9.67	10.60	11.75
Média material perdida (%)	10.18			

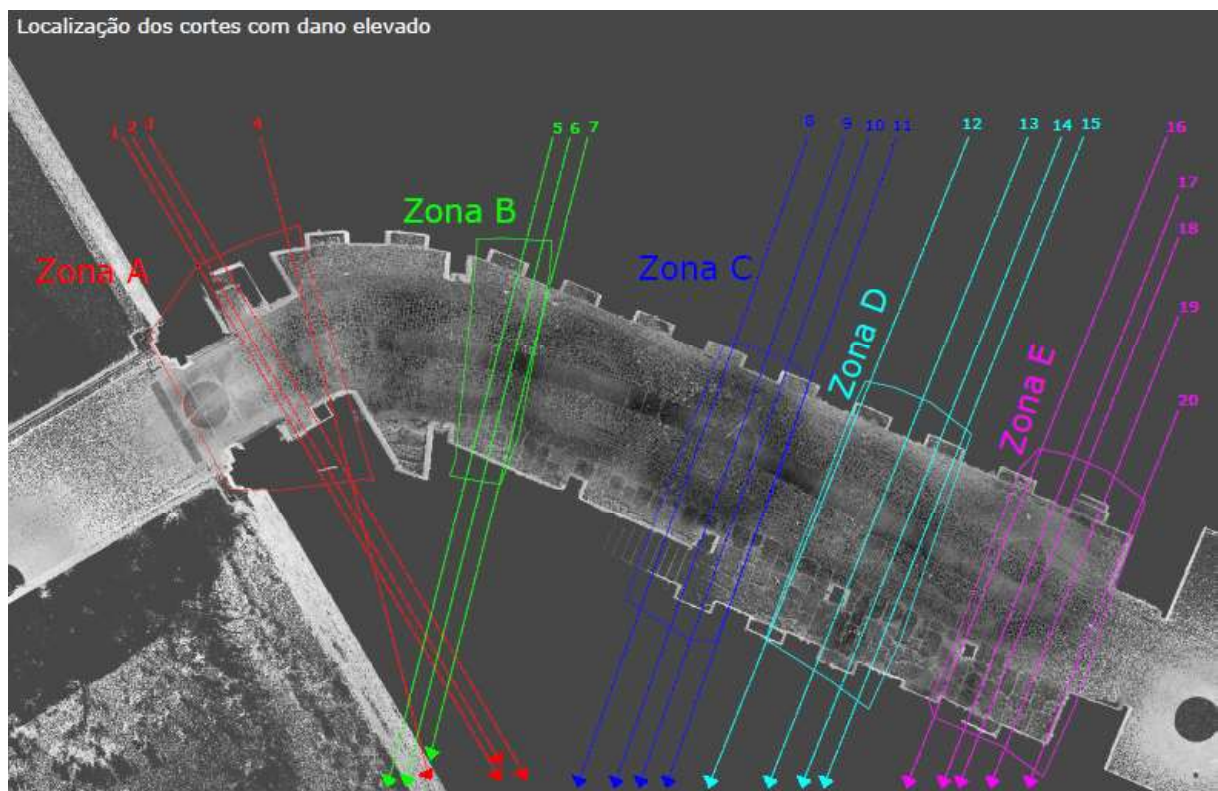
Ao analisar as tabelas 13, 14 e 15, é possível verificar uma percentagem de material perdido ao longo do tempo na Zona B um pouco superior das restantes zonas. Contudo todos os cortes



estudados revelam maior perda de material do lado direito, relativo a porta de entrada, o que leva a pensar que um dos principais fatores desta perda é o desgaste provocado pela passagem do vento, uma vez que o traçado do túnel é em curva houve sempre maiores correntes de ar na zona do lado direito. O valor médio de material de arco estrutural perdido das três zonas é cerca de 10.22 %, o que demonstra uma enorme perda de material no elemento estrutural com espessura de 40 cm, levando a suspeitar um pouco a estabilidade deste.

### 5.5.2. Levantamento laser na porta magistral de Santo António

Na porta magistral de Santo António foram detetadas cinco zonas com dano elevado, face a comparação com o restante do túnel. Dessas cinco zonas escolhidas, recolheram se vinte cortes para o cálculo do material do arco perdido ao longo do tempo. Na **Figura 156** está representada a localização dos cortes estudados.



**Figura 156-** Planta de localização dos cortes na porta magistral de Santo António.

O processamento dos cortes para a obtenção das áreas das **Tabelas 16, 17, 18, 19 e 20** estão apresentados no Anexo 6, devidamente escalados e mapeados.

**Tabela 16-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona A.

	Zona A			
	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
Área secção original (m2)	4.07	4.24	4.43	4.51
Área secção atual (m2)	3.69	3.76	4.03	4.06
Área secção perdida (m2)	0.38	0.48	0.40	0.45
Material perdido (%)	9.26	11.37	9.07	10.02
Média material perdida (%)	9.93			

**Tabela 17-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona B.

	Zona B		
	Corte 5	Corte 6	Corte 7
Área secção original (m2)	3.31	4.47	3.84
Área secção atual (m2)	2.96	4.13	3.59
Área secção perdida (m2)	0.34	0.34	0.25
Material perdido (%)	10.41	7.63	6.53
Média material perdida (%)	8.19		

**Tabela 18-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona C.

	Zona C			
	Corte 8	Corte 9	Corte 10	Corte 11
Área secção original (m <sup>2</sup> )	4.09	4.00	3.89	3.97
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.83	3.76	3.64	3.75
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.26	0.25	0.25	0.22
Material perdido (%)	6.36	6.17	6.47	5.64
Média material desgaste (%)	6.16			

**Tabela 19-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona D.

	Zona D			
	Corte 12	Corte 13	Corte 14	Corte 15
Área secção original (m <sup>2</sup> )	4.03	4.00	4.00	3.97
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.82	3.72	3.78	3.71
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.21	0.28	0.23	0.26
Material perdido (%)	5.20	7.00	5.72	6.45
Média material perdido (%)	6.09			

**Tabela 20-** Cálculo do material perdido ao longo do tempo na zona E.

	Zona E				
	Corte 16	Corte 17	Corte 18	Corte 19	Corte 20
Área secção original (m <sup>2</sup> )	3.92	3.71	3.74	3.68	3.75
Área secção atual (m <sup>2</sup> )	3.73	3.56	3.49	3.42	3.59
Área secção perdida (m <sup>2</sup> )	0.19	0.15	0.25	0.26	0.16
Material pedido (%)	4.91	3.93	6.66	6.99	4.22
Média material perdido (%)	5.34				

Pela análise das *Tabelas 16,17,18,19 e 20*, é possível verificar que a zona A tem um desgaste pouco superior às restantes zonas, talvez devido a sua proximidade com a fachada principal, estando mais exposta aos agentes de deterioração. A porta de Santo António apresenta perda de material não uniforme, observando-se na zona de entrada principal um desgaste na zona central do arco, tendo tendência a convergir ao longo do túnel para o lado direito, relativo a entrada principal da porta. Sendo assim, tal como na porta de São Francisco, a porta de Santo António permite concluir que um dos principais fatores desta perda de material é o desgaste provocado pela passagem do vento, uma vez que o desgaste acompanha a trajetória de passagem do vento. O valor médio de material de arco estrutural perdido das cinco zonas é cerca de 7,14 %, o que demonstra uma enorme perda de material no elemento estrutural com espessura de 40 cm, apesar de ser inferior ao valor obtido para a outra porta magistral.

## 5.6. Conclusões

A elaboração deste capítulo permitiu através da execução de ensaios sísmicos o conhecimento das velocidades das ondas das ondas P e S e ainda a determinação dos módulos de elasticidade na alvenaria e na pedra existentes nas portas magistrais da Fortaleza de Almeida. Com o conhecimento destas velocidades de propagação foi possível a execução de ensaios impacto-eco o que possibilitou o estudo da morfologia das paredes e outros elementos estruturais das portas magistrais.

O levantamento de georadar, apesar de pouco determinante no caso da porta magistral de Santo António, permitiu validar algumas espessuras e distâncias determinadas através dos ensaios de impacto-eco o que atribui maior segurança aos valores obtidos.

Relativamente ao levantamento laser também abordado nesta secção, este permitiu determinar o desgaste existente no arco estrutural de cada porta magistral. Os resultados obtidos foram bastante consideráveis, visto que foram atingidas percentagens de desgaste nos arcos as portas entre os cinco e onze por cento. Estas percentagens revelam-se elevadas pois o desgaste é maioritariamente nas zonas das juntas, o que em alguns casos representa uma zona de contacto de 10 cm numa junta de extensão de 40 cm.

## CAPÍTULO 6. Ensaios em laboratório

### 6.1. Introdução

Em espaço laboratorial e com as amostras recolhidas in situ foram realizados três tipos de ensaios, nomeadamente ensaios a compressão do granito, ensaios “double punch test” nas argamassas, análise microscópica de amostras de granito, por fim, análise expedita de sulfatos. Os ensaios de compressão foram realizados em cubos de granito retirados no local, com o principal objetivo de estimar as propriedades mecânicas do granito que constitui as duas portas magistrais. Os ensaios “double punch test”, utilizaram-se para testar umas amostras de argamassa pertencente as juntas das portas, de maneira a tentar obter as propriedades mecânicas da argamassa das juntas. A análise microscópica usada para analisar várias amostras de material recolhido em local, com o intuito de detetar os tipos de minerais e elementos químicos presentes em cada amostra, correlacionar com os granitos da zona e tentar determinar os principais fatores associados a deterioração do granito dos edifícios das portas. Por fim, os testes de sulfatos utilizaram-se com o intuito de detetar a presença e concentração de sulfatos in situ.

### 6.2. Ensaios a compressão do granito

Os ensaios de compressão axial foram executados com o intuito de obter a resistência mecânica de 24 provetes. Segundo a norma EN 1926:2006, o ensaio de resistência à compressão uniaxial permite avaliar o desempenho de provetes colocados entre dois pratos paralelos e sujeitos a uma carga uniaxial.

As amostras para os ensaios foram provenientes de dois blocos de granito (um de cor amarela e outro de cor branca) sobressalentes das obras anteriores realizadas na Fortaleza de Almeida. Após a sua recolha e transporte, procedeu-se um primeiro esquadreamento (*Figura 157*) dos dois blocos para possibilitar uma primeira leitura de ultrassons no laboratório. A leitura de ultrassons foi executada nas três direções possíveis, fazendo em cada face a leitura em cinco pontos (um central e os restantes a cerca de 3cm das arestas). Os dados relativos a esta primeira leitura ultrassons (ver *Tabela 1* e *Tabela 2* do Anexo 7), revelaram valores de velocidades para a pedra amarela no intervalo de 900-2150m/s e para a pedra branca aproximadamente de 680-950m/s. Relativamente a pedra amarela as velocidades adquiridas por ultra-sons, possuem alta

variabilidade, principalmente a nível de diferenças entre as velocidades das diversas direções no mesmo bloco, o que poderá apontar para a existência de várias descontinuidades no interior do bloco granito ou mesmo a existência de planos de anisotropia. No caso da pedra branca, as velocidades obtidas foram bastante baixas, porém a existência de descontinuidades no interior e o estado de degradação visível do granito poderá ser a origem destas.



**Figura 157-** Paralelepípedo de granito amarelo depois do esquadrejamento.

Na fase seguinte os blocos foram cortados para a obtenção de provetes em forma de cubos com dimensões  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ . Após o corte dos provetes selecionaram-se 24 cubos (12 do bloco amarelo e 12 do bloco branco) foi necessário a utilização da retificadora existente no Laboratório de Materiais de Engenharia Civil da Universidade do Minho, de forma a garantir que no período de ensaios os pratos da máquina fiquem em contacto total com as faces dos provetes.

Os ensaios de compressão foram realizados em duas fases, uma primeira em que se testaram seis cubos da pedra amarela e seis cubos da pedra branca após secagem há temperatura ambiente, e uma segunda fase em que se testaram seis cubos de pedra amarela e seis cubos de pedra branca após secagem na estufa até se atingir massa constante dos provetes.

Antes de ambas as fases dos ensaios de compressão efetuou-se novamente leituras de ultrassons para todos os provetes de ensaio nas três direções, bem como novas medições e pesagens (**Figura 158**) dos provetes. Os valores obtidos para as leituras encontram-se nas **Tabelas 3, 4, 5 e 6** do Anexo 7 e fizeram em geral denotar um aumento das velocidades de propagação, aumento este, consequência da redução das descontinuidades dos provetes, pois na fase de corte tentou-se descartar o máximo as fendas e fissuras presentes nos blocos.



Para a execução dos ensaios de compressão uniaxial utilizou-se o pórtico de carga E4 (**Figura 159**) do LEST da Universidade do Minho.



**Figura 158-** Medição (a) e pesagem (b) dos provetes.



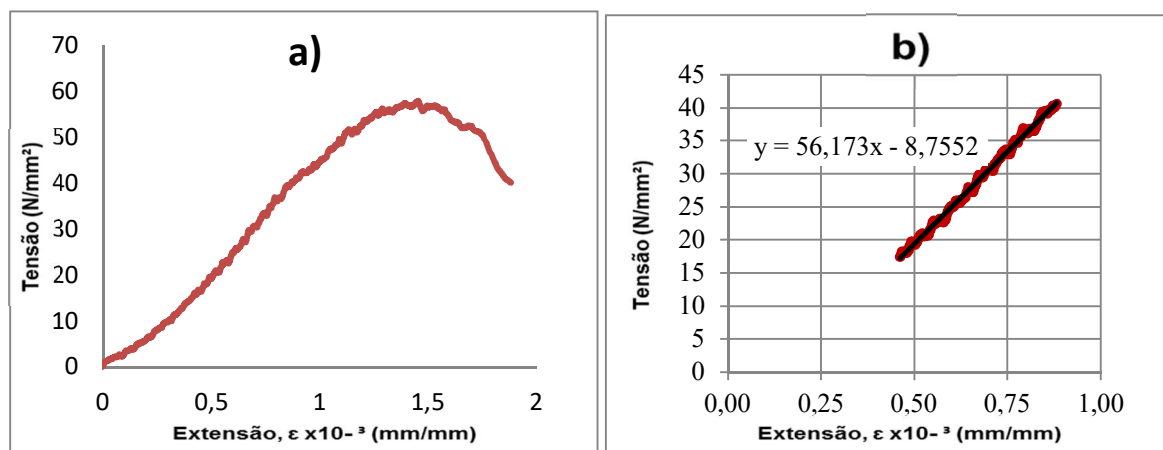
**Figura 159-** Equipamento utilizado nos ensaios de compressão (Pórtico de carga E4)

Todos os ensaios foram realizados com controlo de deslocamento, sendo o deslocamento obtido pela média dos três sensores de deslocamento, os LVDTs apresentados na **Figura 160**. É também de referir que todos os provetes foram ensaiados segundo a direção de maior velocidade das ondas P, visto que teoricamente é a direção mais resistente da pedra.



**Figura 160-** Provete de granito antes do início de ensaio.

Na **Tabela 21, 22, 23 e 24** estão representados os resultados dos ensaios de compressão relativos as duas fases de ensaios. O valor do módulo de elasticidade foi obtido através do declive de uma regressão linear traçada entre os 30% e os 70% do valor máximo do regime elástico de cada provete, conforme o exemplo da **Figura 161**.



**Figura 161-** Exemplo determinação do módulo de elasticidade para um provete: a) Gráfico extensão-tensão do ensaio; b) Regressão linear da determinação do módulo de elasticidade.

**Tabela 21-** Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra amarela testados com secagem a temperatura ambiente.

Pedra amarela (ambiente)				
Provete	Área (mm²)	Força Máxima (KN)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PV-1	2516.80	150.50	59.80	55276.62
PV-2	2370.79	175.60	74.07	91240.64
PV-3	2413.74	159.20	65.96	79335.59
PV-4	2569.21	183.30	71.34	79940.75
PV-5	2584.50	187.60	72.59	86188.83
PV-6	2480.96	193.40	77.95	87150.84
Média	2489.34	174.93	70.28	84771.33
D. Padrão	84.9	16.8	6.5	5059.8
CoV(%)	3%	10%	9%	6%
Máx	2584.50	193.40	77.95	91240.64
Min	2370.79	150.50	59.80	55276.62

**Tabela 22-** Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra branca testados com secagem em temperatura ambiente.

<b>Pedra branca (ambiente)</b>				
<b>Provete</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força máxima (KN)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
<b>PV-1</b>	2429.01	81.50	33.55	28632.24
<b>PV-2</b>	2436.90	74.50	30.57	27933.60
<b>PV-3</b>	2380.08	63.70	26.76	16165.42
<b>PV-4</b>	2440.34	82.00	33.60	27613.27
<b>PV-5</b>	2381.68	71.10	29.85	20489.56
<b>PV-6</b>	2464.62	87.60	35.54	32902.26
<b>Média</b>	2442.71	81.40	33.32	29270.34
<b>D. Padrão</b>	15.35	5.37	2.05	2458.37
<b>CoV(%)</b>	1%	7%	6%	8%
<b>Máx</b>	2464.62	87.60	35.54	32902.26
<b>Min</b>	2380.08	63.70	26.76	16165.42

**Tabela 23-** Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra amarela testados com secagem na estufa.

<b>Pedra amarela (massa constante)</b>				
<b>Provete</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força máxima (KN)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
<b>PV-1</b>	2477.02	172.00	69.44	39338.63
<b>PV-2</b>	2430.38	135.60	55.79	35962.03
<b>PV-3</b>	2484.67	144.80	58.28	30222.02
<b>PV-4</b>	2521.03	188.20	74.65	33193.86
<b>PV-5</b>	2537.26	191.00	75.28	64282.00
<b>PV-6</b>	2391.18	187.00	78.20	69235.45
<b>Média</b>	2473.6	169.77	68.61	33125.97
<b>D. Padrão</b>	54.9	24.0	9.4	2870.6
<b>CoV(%)</b>	2%	14%	14%	9%
<b>Máx</b>	2537.26	191.00	78.20	69235.45
<b>Min</b>	2391.18	135.60	55.79	30222.02

**Tabela 24-** Resultados ensaios de compressão para cubos da pedra branca testados com secagem na estufa.

Pedra branca (massa constante)				
Provete	Área (mm <sup>2</sup> )	Força máxima (KN)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )
PV-1	2376.50	71.40	30.04	23233.82
PV-2	2410.59	101.20	41.98	35135.88
PV-3	2489.27	102.30	41.10	39813.17
PV-4	2297.93	61.40	26.72	20458.40
PV-5	2314.57	107.50	46.44	38302.29
PV-6	2423.09	78.40	32.36	24080.47
Média	2404.81	103.67	43.17	37750.45
D.	87.5	3.4	2.9	2387.0
Padrão				
Cov(%)	4%	3%	7%	6%
Máx	2489.27	107.50	46.44	39813.17
Min	2297.93	61.40	26.72	20458.40

Para a primeira fase de ensaios o obteve-se valor médio de resistência a compressão de 70.28 MPa para os provetes pedra amarela e de 30.32 MPa para os provetes de pedra branca. Os valores médios de módulo de elasticidade obtidos foram, 84.77 GPa para os provetes de pedra amarela e 29.27 GPa para os provetes de pedra branca.

Relativamente a segunda fase de ensaios, provetes anteriormente sujeitos a estufa até ser atingida a massa constante, os valores adquiridos variaram um pouco. No caso dos provetes de pedra amarela a resistência a compressão foi de 68.61 MPa, refletindo um pequeno descaimento face à anterior fase de ensaios. Para os provetes de pedra branca o valor subiu um pouco comparativamente com a anterior fase de ensaios, obtendo-se o valor de 43.77 MPa de resistência a compressão. A média módulos de elasticidade obtidos para pedra amarela foi de 33.13 GPa e de 37.75 GPa para a pedra branca. Na **Tabela 25** e para efeitos de comparação apresenta-se a os valores da resistência mecânica à compressão uniaxial de diferentes rochas provenientes de estudos de Noronha et al. (2011), Burcio (2004), Vasconcelos et al. (2005), Bell (2007) e Mogi (2007).

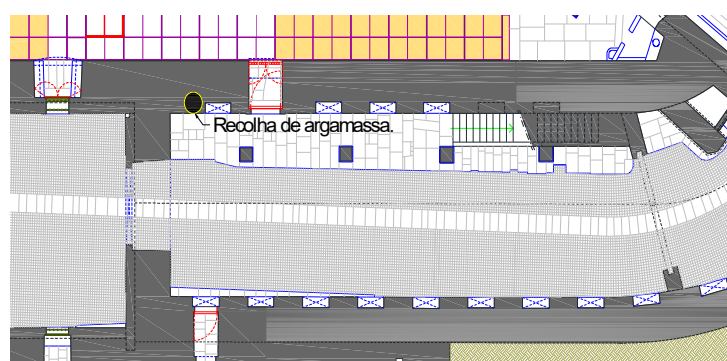
**Tabela 25-** Resistência à compressão de diferentes rochas. Fonte: (Barros, 2013)

Tipo de rocha	Resistência á compressão (MPa)
Xisto	[31,00-221,00]
Granito	[26,00-159,80]
Basalto	[40,00-413,00]
Arenito	[22,00-82,00]
Calcário	[15,60-96,40]
Ardósia	[72,30-96,40]
Mármore	[48,90-65,70]

Os valores obtidos nos ensaios enquadram-se dentro do intervalo dos granitos da **Tabela 25**. Os granitos estudados possuem elevada semelhança com dois granitos (cinza Pinhel e amarelo de Figueira) explorados em pedreiras da zona, sendo que o cinza Pinhel se aproxima da pedra branca estudada e o amarelo de Figueira com o a pedra amarela ensaiada. Segundo o INETI (ver fichas técnicas dos granitos no Anexo 7 e 8), a resistência mecânica à compressão para o granito cinza Pinhel é de 186.33 MPa e para o amarelo é de 161.80 MPa. Comparando estes valores com os obtidos nos ensaios, pode-se concluir que os valores dos ensaios de resistência são bastante inferiores, porém há que ter em atenção que se compara pedra sãs de pedreira com pedras aplicadas há centenas de anos.

### 6.3. Ensaios “double punch test”

Para a execução dos ensaios “double punch test” seguiu-se a norma DIN 18555-9:2009 com o intuito determinar a resistência a compressão dos provetes de argamassa recolhidos no local. Os provetes utilizados foram recolhidos no local representado na **Figura 162**, à altura aproximadamente de dois metros, pertencente o interior da porta magistral de Santo António.

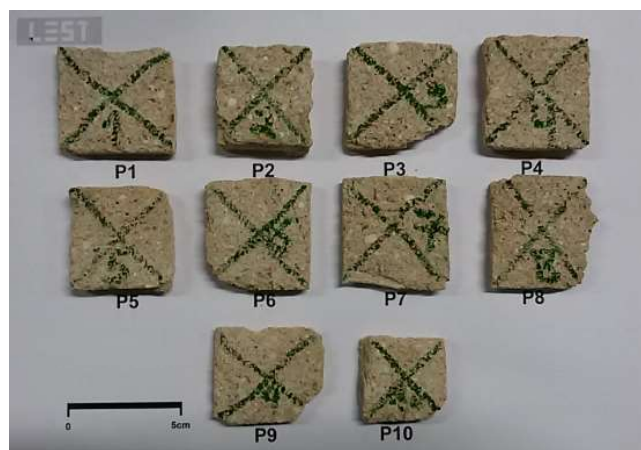


**Figura 162-** Local de recolha da argamassa.

Após a recolha da argamassa no local, procedeu-se a preparação dos provetes, onde houve necessidade de cortar, em quadrados de cerca 5 cm e regularizar as faces de maneira a permitir um bom contacto com o equipamento a utilizar. A regularização das faces foi realizada desperdiçando o mínimo de material dos provetes, pois estes já se encontravam com espessura reduzida.

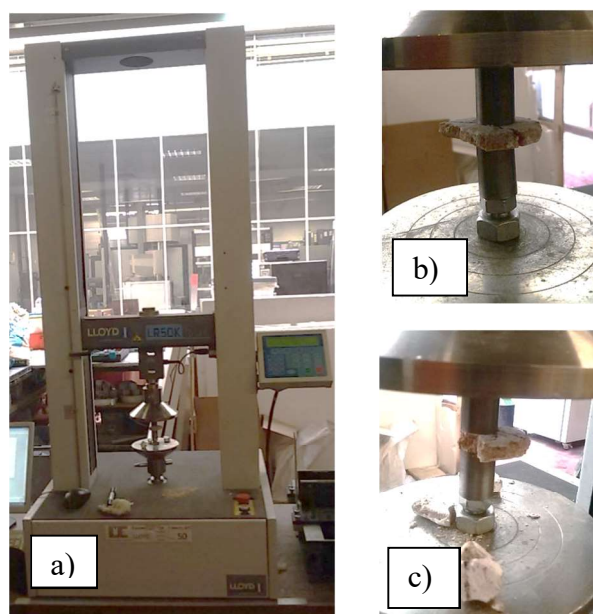
Na **Figura 163** estão representados os dez provetes utilizados para a realização do “double punch test” depois de esquadrejados e com as faces regularizadas. O estado frágil das amostras não permitiu o corte perfeito ao nível das dimensões desejadas, porém estas diferenças de áreas

dos provetes não demonstram qualquer diferença na execução dos ensaios, uma vez que área carregada será apenas o círculo de dois centímetros de diâmetro no interior do provete. É importante referir que houve necessidade de medir as espessuras dos provetes antes dos ensaios com o recurso a um paquímetro digital, pois esta influencia os resultados obtidos para a estimativa da resistência à compressão.



**Figura 163-** Provetes de argamassa utilizados nos ensaios.

Na **Figura 164** está representado o equipamento de ensaio utilizado, pertencente ao Laboratório de Materiais da Universidade do Minho, bem como algumas imagens da execução do ensaio os ensaios foram realizados com recurso a uma célula de carga de 10 KN, a uma velocidade de carga de 0.002 KN/s. Para respeitar a norma DIN anteriormente referida, houve necessidade de colocar uma rótula na base, pois a norma exige que os cilindros metálicos devem estar perfeitamente alinhados na vertical.



**Figura 164-**a) Pórtico de carga do laboratório de materiais Uminho; b) Proвете de argamassa no início de ensaio; c) Proвете de argamassa no quase no final do ensaio.

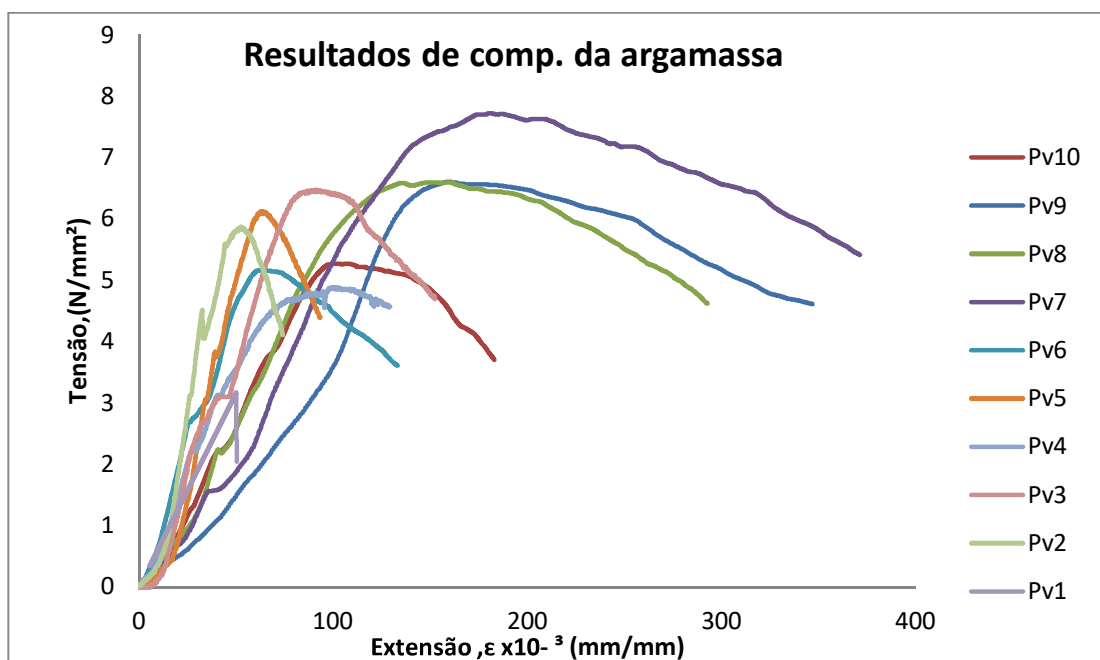


Nos ensaios considerou-se uma área de contacto igual para todos os ensaios, uma vez que os cilindros usados foram sempre os mesmos. Na **Tabela 26** estão apresentados os resultados dos ensaios, em que para além da força aplicada, realizou-se o cálculo da resistência e ainda do módulo de elasticidade estático  $E_s$ . Para o cálculo da resistência utilizou-se a seguinte expressão para cada provete:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad ,$$

onde  $f_c$  é a resistência,  $F$  a força máxima aplicada no provete e  $A$  a área de ensaio do provete. No cálculo do módulo de elasticidade houve necessidade de traçar o gráfico extensão-tensão, para posteriormente obter o declive de uma regressão linear entre os 30 e 70 por cento da tensão máxima instalada.

Considerando-se que a área é a mesma para cada amostra, a característica mais importante é a relação entre a espessura e a tensão de compressão obtidas a partir do ensaio de “punch test”. Para o mesmo material, os resultados esperados deste ensaio refletem uma força é maior quando a espessura é menor devido ao efeito de confinamento (Mc Insignificante, 1985). Na **Figura 165** estão representadas as curvas tensão-extensão dos provetes de argamassa ensaiados recolhidas, durante os ensaios “double punch test”. Na **Tabela 26** estão representados os resultados obtidos para os provetes de argamassa.



**Figura 165-** Curvas tensão-extensão dos provetes recolhidas durante os ensaios “double punch test”.

**Tabela 26-** Resultados dos ensaios na argamassa.

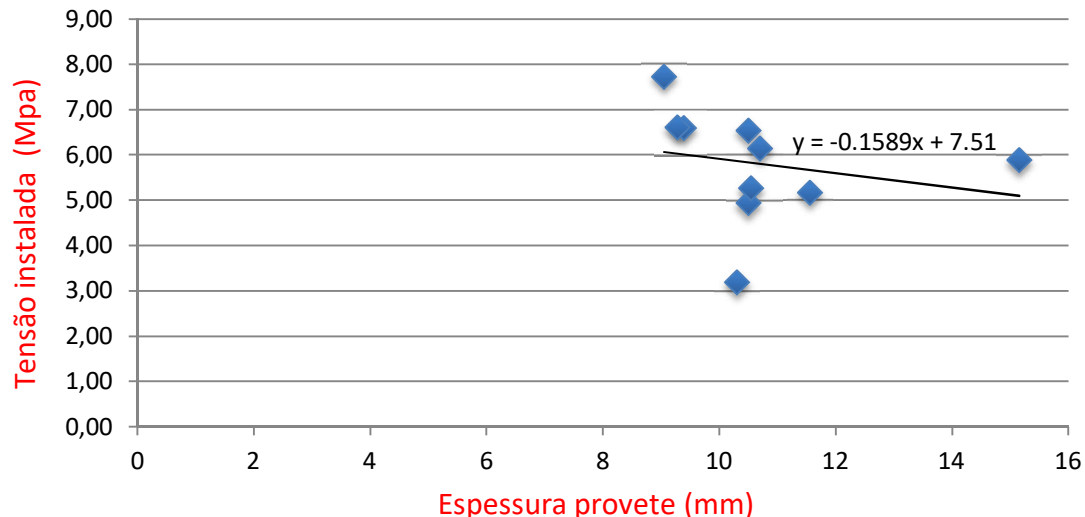
Provete	Espessura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força Máxima (KN)	Resistência (MPa)	Resistência corrigida (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PV-1	10,3	314.16	1.00	3.18	0.88	63.29
PV-2	15.16	314.16	1.85	5.89	1.63	209.00
PV-3	10.5	314.16	2.05	6.53	1.80	62.50
PV-4	10.5	314.16	1.55	4.94	1.36	69.90
PV-5	10.7	314.16	1.93	6.15	1.70	140.80
PV-6	11.56	314.16	1.62	5.16	1.43	72.50
PV-7	9.05	314.16	2.43	7.73	2.14	73.10
PV-8	9.39	314.16	2.07	6.59	1.82	64.30
PV-9	9.28	314.16	2.07	6.61	1.83	49.00
PV-10	10.55	314.16	1.66	5.27	1.46	60.70
<b>Média</b>	10.7	314.16	1.82	5.80	1.61	86.51
<b>D. Padrão</b>	1.7	0.0	0.4	1.2	0.33	49.8
<b>Cov(%)</b>	16%	0%	21%	21%	21%	58%
<b>Máx</b>	15.16	314.16	2.43	7.73	2.14	209.00
<b>Min</b>	9.05	314.16	1.00	3.18	0.88	49.00

**Figura 166-** Amostras de argamassa após os ensaios.

A força máxima e resistência média atingida para os ensaios de compressão da argamassa foram iguais a 1.82 MPa e 5.80 MPa, respectivamente. O valor obtido para o coeficiente de variação (21 %) deve-se à diferente espessura dos provetes testados. Relativamente ao valor médio do módulo de elasticidade para a argamassa nestes ensaios, obteve-se o valor de 86.51 MPa. Trata-

se de um valor muito elevado para uma argamassa e deve-se à geometria dos provetes. A variabilidade dos resultados foi da ordem dos 58%.

Contudo os resultados permitiram confirmar que para maior espessura do provete menor terá de ser a força carregada para se atingir a ruptura, como se pode verificar no gráfico da **Figura 167**.

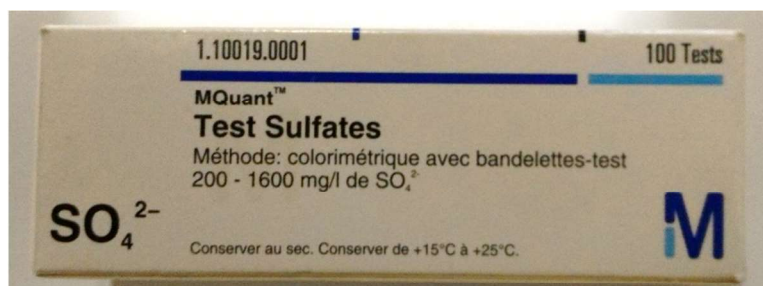


**Figura 167-** Gráfico de relação espessura do provete e tensão instalada.

De forma a normalizar o valor obtido de resistência para estes provetes de argamassa, recorreu-se a um trabalho em que foi realizada uma comparação dos valores obtidos através deste ensaio com os ensaios de cubos normalizados (Sassoni & Mazzotti, 2013). A análise deste trabalho permite concluir que os valores obtidos através dos ensaios “double punch test” para a resistência à compressão ( $f_c$ ) dos provetes são cerca de 3.62 vezes maiores que os esperados para os ensaios de compressão em cubos normalizados. Em suma, uma vez que se obteve o valor médio para os ensaios realizados de 5.8 MPa, pode afirmar-se que o valor médio esperado para resistência à compressão de cubos normalizados seria de aproximadamente 1.6 MPa.

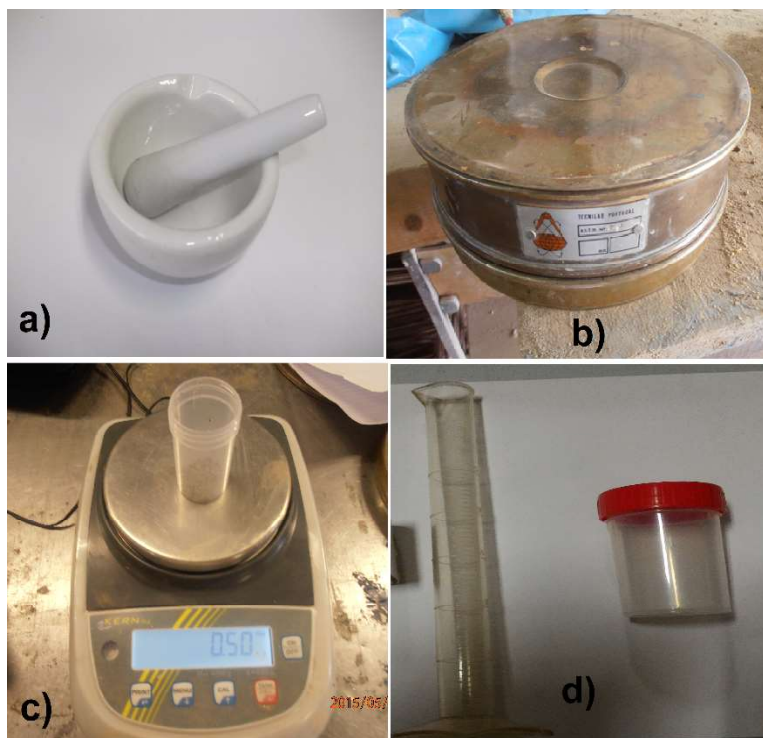
#### 6.4. Análise Expedita aos sulfatos

Para deteção de sulfatos foram utilizadas tiras colorimétricas de ensaio da marca MQuant (**Figura 168**). As amostras utilizadas foram recolhidas de patologias existentes nas portas da Fortaleza de Almeida e encontram-se mais detalhadas no quarto capítulo desta obra. Apenas as amostras que poderiam conter sulfatos foram analisadas.



**Figura 168-** Tiras colorimétricas de testes de sulfatos utilizadas.

O material utilizado (**Figura 169**) nos ensaios, para além das tiras colorimétricas, foi água destilada, uma proveta plástica graduada, um copo graduado plástico, uma balança de duas casas decimais, um peneiro nº20 e um almofariz.

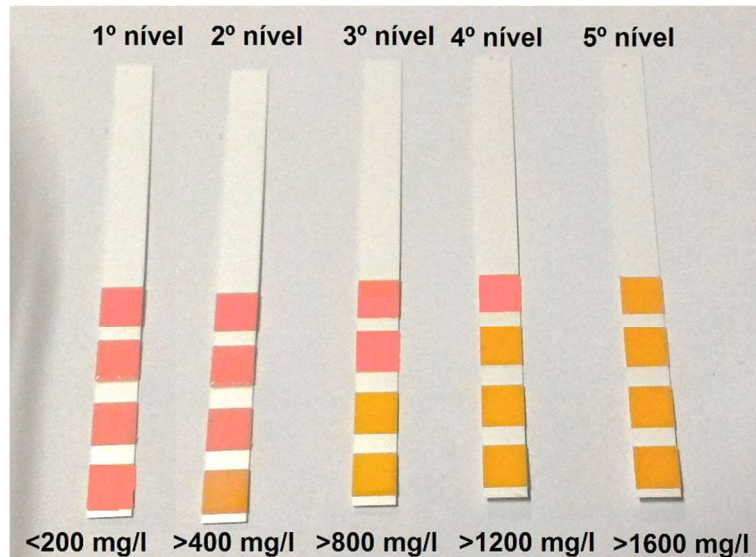


**Figura 169-** Equipamento utilizado para a execução dos ensaios: a) Almofariz; b) Peneiro nº20; c) Balança; d) Proveta graduada e copo graduado plástico.

O procedimento utilizado para o ensaio contém as seguintes etapas de execução:

- Redução granulométrica da amostra a ensaiar com o auxílio do almofariz;
- Passagem da amostra pelo peneiro nº20, de maneira a se obterem as partículas mais finas;
- Pesagem da quantidade de massa pretendida;
- Agitação da massa pretendida com 25 ml de água destilada durante 5 minutos no copo de plástico graduado;
- Introdução da mistura na proveta graduada e repouso desta até o material sólido atingir o fundo;
- Penetração da tira colorimétrica durante 1 minuto, secagem nas condições ambientes da tira durante 2 minutos e por fim determinação do esquema de cores obtido que corresponderá a uma determinada concentração.

Para as tiras colorimétricas utilizadas existem 5 níveis de concentração possíveis. A representação dos níveis bem como a respetiva concentração de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) encontram-se apresentados na **Figura 170**.



**Figura 170-** Esquema de cores dos 5 possíveis níveis, bem como a respetiva concentração de sulfatos.

Relativamente a massa de amostra usada para cada ensaio, optou-se após alguns testes fazer variar a massa de cada amostra de forma a tentar estimar a partir de que quantidade de material a concentração de sulfatos variava também. Os resultados dos ensaios expeditos com as tiras colorimétricas de sulfatos encontram-se na .

**Tabela 27-** Resultados dos ensaios com tiras colorimétricas para sulfatos.

Amostra	Teste sulfatos	Líquido utilizado (g)	Massa diluída (g)	Concentração de sulfatos (mg/l)
<b>2</b>	1	25	0.5	400-800
	2	25	2	400-800
	3	25	8	800-1200
<b>6</b>	1	25	0.5	400-800
	2	25	2	400-800
	3	25	8	400-800
<b>7</b>	1	25	0.5	1200-1600
	2	25	2	>1600
	3	25	1	1200-1600
	4	25	0.2	400-800
<b>8</b>	1	25	0.5	400-800
	2	25	2	800-1200
	3	25	8	>1600
<b>9</b>	1	25	0.5	>1600
	2	25	2	>1600
	3	25	8	>1600
<b>11</b>	1	25	0.5	400-800
	2	25	2	400-800
	3	25	8	400-800
<b>12</b>	1	25	0.5	<200
	2	25	2	400-800
	3	25	8	800-1200
<b>13</b>	1	25	0.5	<200
	2	25	2	400-800
	3	25	8	400-800
<b>16</b>	1	25	0.5	800-1200
	2	25	2	800-1200
	3	25	8	>1600
<b>18</b>	1	25	0.5	<200
	2	25	2	400-800
	3	25	8	400-800
<b>19</b>	1	25	0.5	<200
	2	25	2	400-800
	3	25	8	1600
<b>20</b>	1	25	0.5	<200
	2	25	2	400-800
	3	25	8	400-800

A análise da revela que em algumas amostras a variação da massa da amostra não revela qualquer tipo de diferença a nível de concentração de sulfatos, o que leva a concluir que a utilização das tiras de testes de sulfatos permite a obtenção da concentração de sulfatos de uma forma pouco precisa, sendo assim um método pouco rigoroso. Porém revela-se um método bastantes rápido e prático para a deteção da presença de sulfatos.



## 6.5. Análise por MEV-EDE

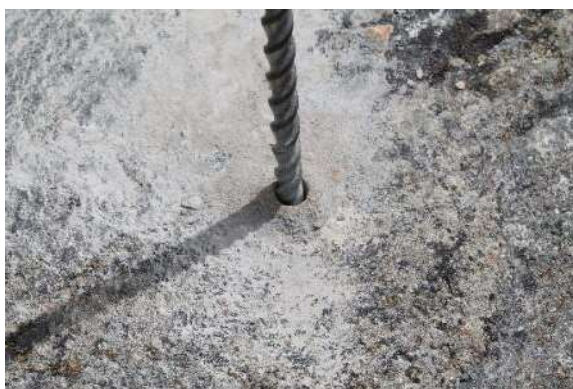
Nesta secção apresenta-se os ensaios por MEV-EDE (microscopia eletrónica com análise química por espectroscopia de dispersão de energias), realizados no Laboratório do AvePark do Grupo de Investigação 3B's da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, utilizando um equipado JEOLSM-6010LV equipado com um espectroscópio de dispersão de energias INCAx-Act, Penta FET Precios a Oxford Instruments.

Para análise escolheram-se amostras pertencentes aos locais 3, 4, 5, 10, 14, 15 e 17, uma vez que se revelaram as mais interessantes a nível de presença de sais. Os provetes das amostras foram preparados fixando a amostra sobre fita-cola de carbono em suportes de alumínio.

Nesta secção optou-se por reorganização dos locais, de forma a permitir uma melhor perceção e discussão dos resultados. Visto isto, optou-se por começar pela amostra 14, uma vez que não se trata de uma patologia, seguindo-se os locais 15 e 17, e finalmente as eflorescências de sais nos locais 3, 4, 5 e 6.

### 6.5.1. Local 14

O local 14, sítio de anterior recolha do material proveniente de um furo de inspeção para câmara buroscópica na cobertura da porta magistral de São Francisco (**Figura 172**), permitiu a obtenção de um provete com o resíduo resultante dessa perfuração (**Figura 171**).



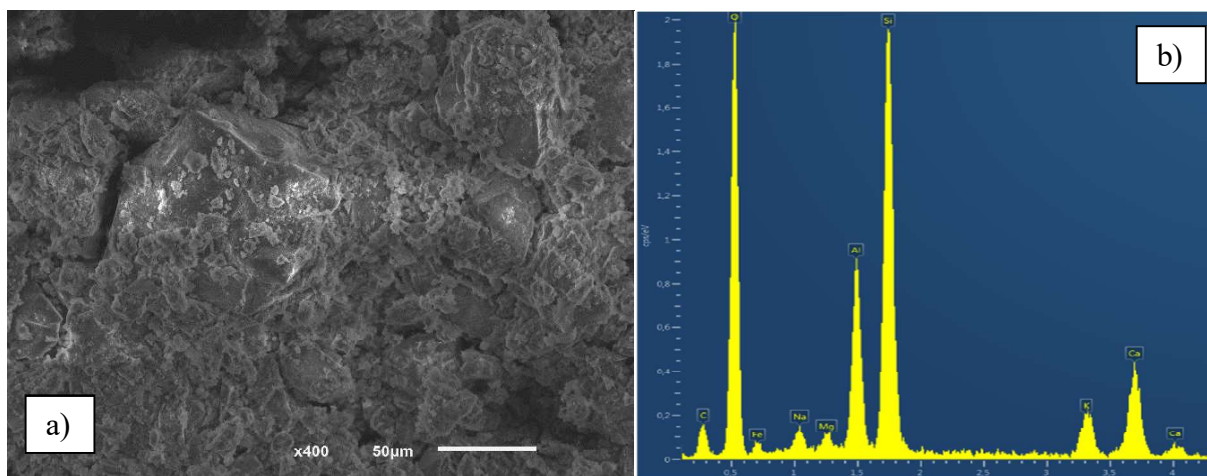
**Figura 172**-Local 14



**Figura 171**- Provete de análise do local

Os dados obtidos da amostra 14 (**Figura 173**), revelam para além da presença esperada de cálcio (Ca) e de carbono (C), a existência de potássio (K), magnésio (Mg), ferro (Fe) e titânio (Ti). Estes resultados são explicáveis pela presença de cimento na amostra (nomeadamente os

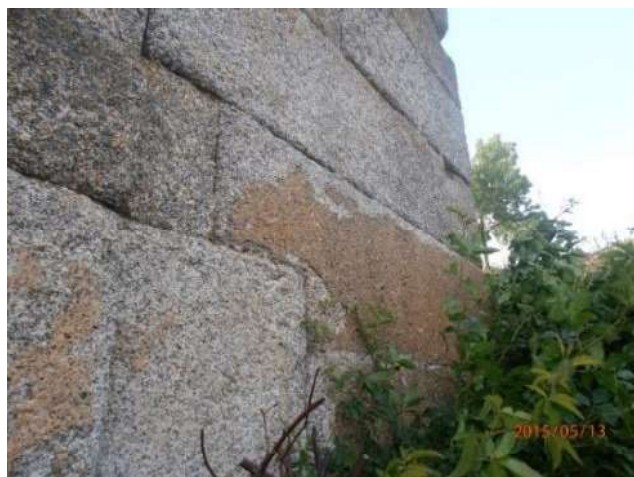
elevados níveis de cálcio, Ca), sendo que a broca de perfuração poderá ter contribuído para os metais detetados.



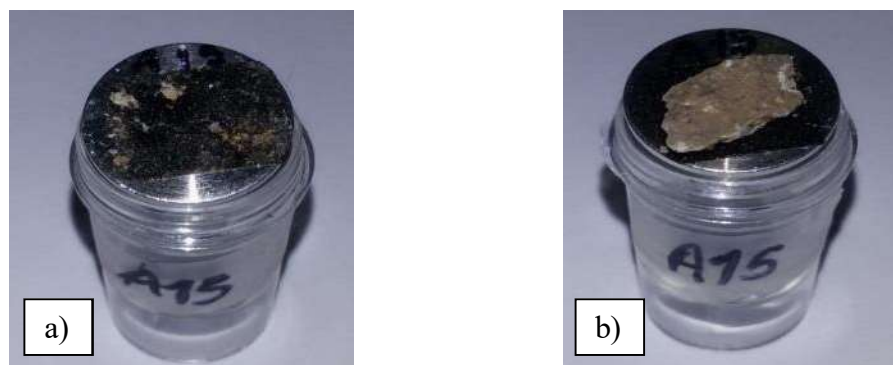
**Figura 173-** Imagem MEV e respectivo espectro retiradas da análise do provete do local 14.

### 6.5.2. Local 15

O local 15, onde anteriormente foi recolhido o material proveniente da escamação superficial do granito da fachada traseira da porta magistral de Santo António (**Figura 174**), permitiu a criação de dois provetes de ensaio, uma com partículas finas da amostra (**Figura 175a**) que será referido como 15a) e uma pequena placa de granito (**Figura 175b**) que será referido como 15b).

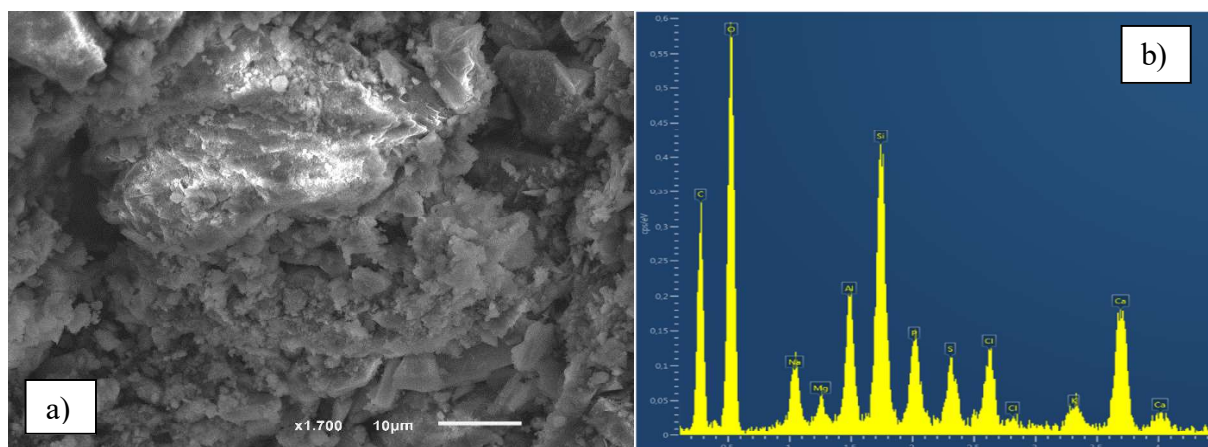


**Figura 174-**Local 15

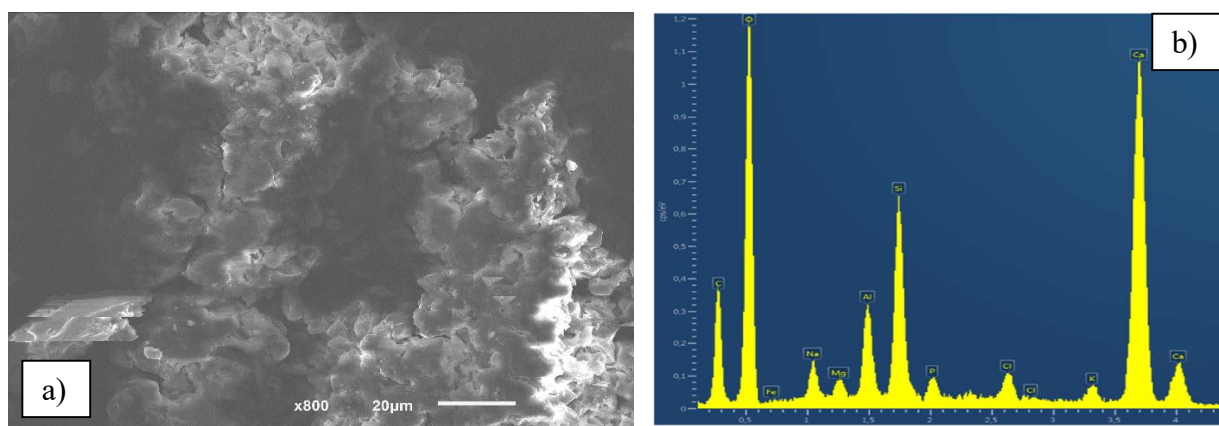


**Figura 175-** Provete de análise do local 15: a) provete com partículas finas; b) provete de análise com placa de granito.

A **Figura 177** correspondente a observações no provete 15a revela um material microgranular, com a presença de quantidades significativas de cálcio (Ca) e de carbono (C). A existência de estes elementos poderá ter como origem os oxalatos ou compostos de cimento. Na **Figura 176** o material apresenta-se amorfo, contendo quantidades significativas de fósforo (P), enxofre (S) e cloro (Cl).



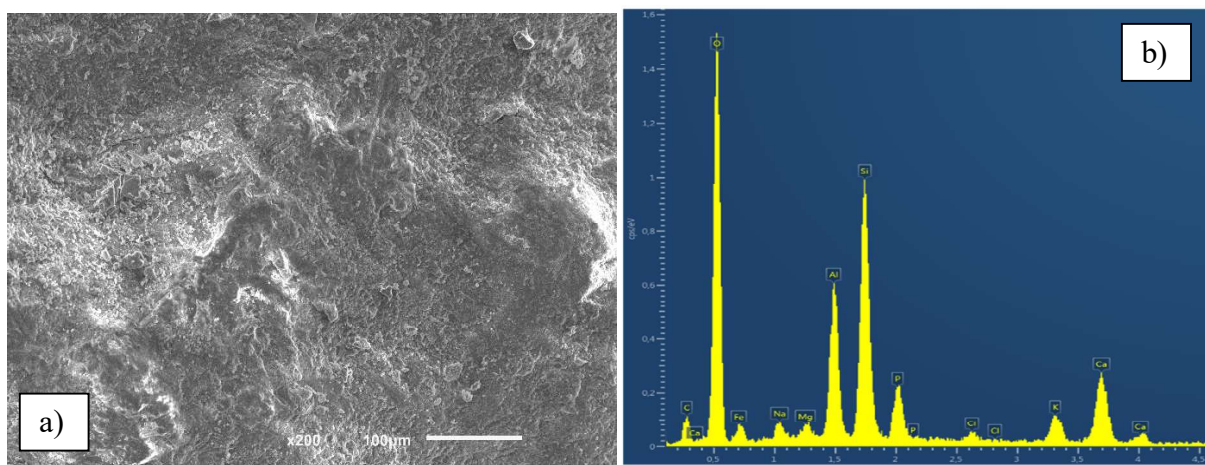
**Figura 177-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) de partículas microgranulares muito ricas em Ca e com aluminossilicatos retiradas da análise do provete de partículas finas do local 15;



**Figura 176-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) de material amorfo enriquecido em P, Cl e S, retiradas da análise do provete de partículas finas do local 15.



Relativamente ao provete 15b), da placa do granito do local 15 (**Figura 178**), foi detetada a presença de fósforo (P), na mesma escala de grandeza de cálcio (Ca), e ainda a ausência de enxofre (S) e cloro (Cl).



**Figura 178-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) retiradas da análise do provete da placa de granito do local 15.

### 6.5.3. Local 17

Do local 17 (**Figura 180**), retirou se um pouco de material pertencente a uma crosta branca, com cerca de 7 mm de espessura, macroscopicamente semelhante às crostas brancas ricas em carbonato de cálcio (com compostos de tipo calcite) em (Alves, 2010), com a qual se preparou o provete da **Figura 179**.



**Figura 180-**Local 17

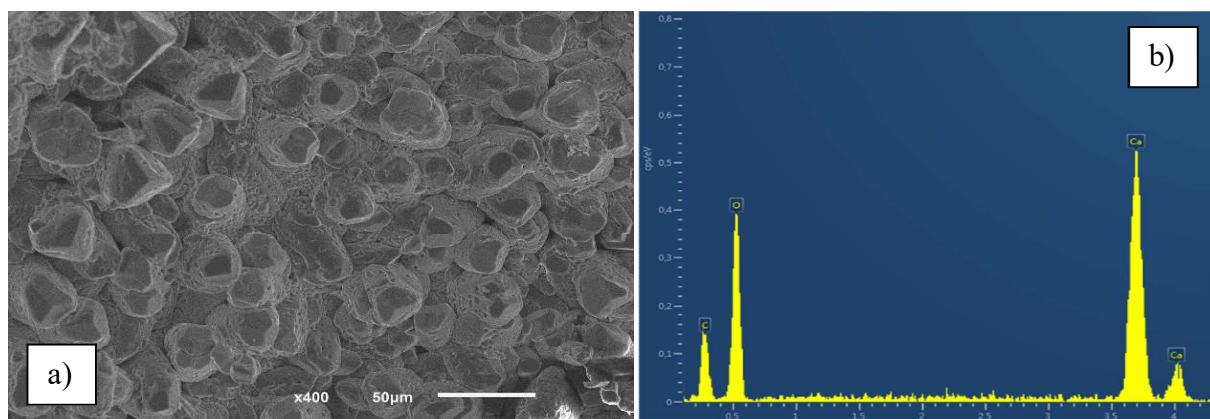


**Figura 179-** Provete de análise do local

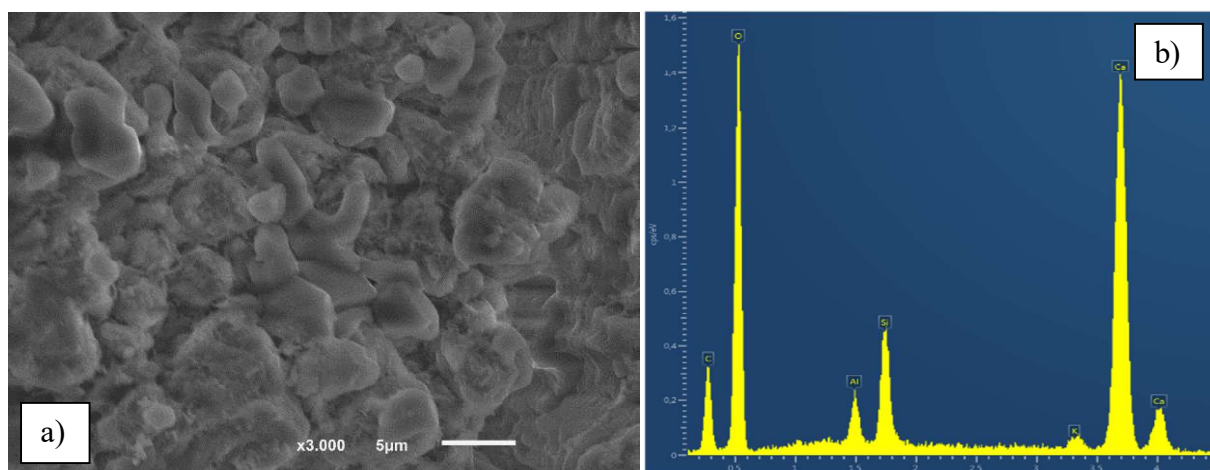
Na **Figura 182** está representada uma imagem do provete do local 17, com um espectro que confirma as crostas de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e com morfologias compatíveis com a

estrutura da calcite. Na **Figura 181** observam-se produtos microgranulares e para além da presença esperado do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), também se observou a presença de silício (Si) e alumínio (Al).

As crostas carbonatas analisadas no local 17 são uma característica comum do ambiente construído (Alves, 2010), onde, apesar da sua elevada expansão e espessura, apenas afeta o desempenho estético dos materiais. A origem desta patologia pode estar associada na possível contribuição de certos materiais usados na construção ou reabilitação da estrutura, atuando assim como poluentes nos restantes materiais (Alves, 2010). Mais interessante será destacar a espessura elevadas das crostas do local 17, que poderá ter origem em várias formações de crostas ao longo do tempo, resultantes de vários episódios de infiltração (Alves, 2010).



**Figura 182-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) de crostas de carbonato de cálcio retiradas da análise do provete do local 17.



**Figura 181-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de silício e alumínio retiradas da análise do provete do local 17.

### 6.5.4. Local 3

Do local 3 (**Figura 184**), extraíram se uns possíveis sais existentes na superfície da alvenaria de granito, permitindo posteriormente a criação de um provete para a análise destes sais (**Figura 183**).

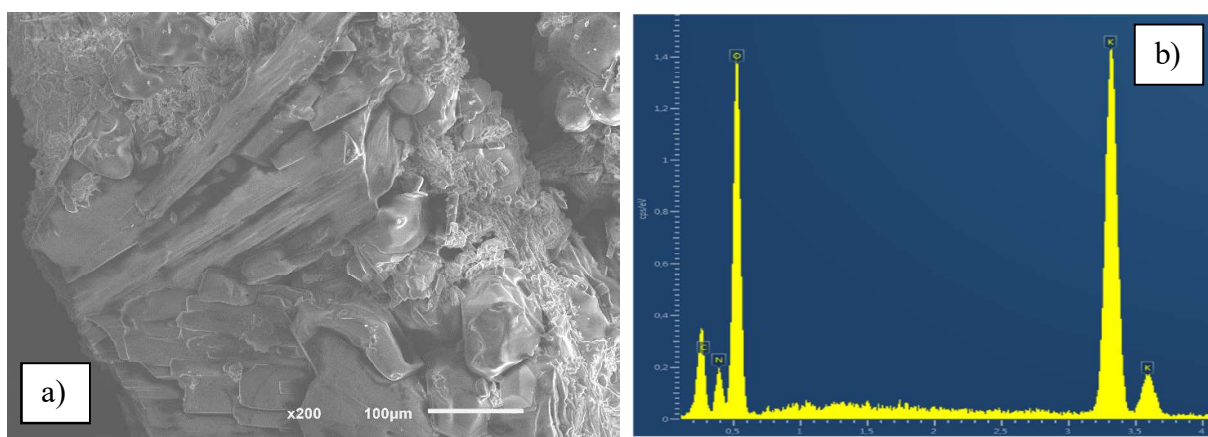


**Figura 184-** Local 3



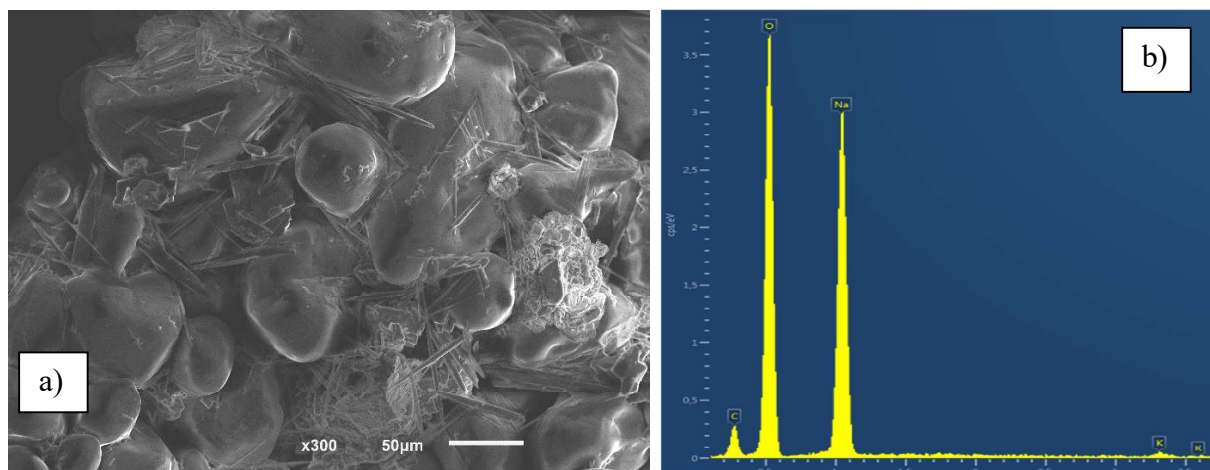
**Figura 183-** Provete de análise do local 3.

A análise da amostra do local 3 permitiu detetar a presença de nitratos, sulfatos e carbonatos alcalinos. Na amostra do local 3 é visível uma associação de vários sais, incluindo agregados de cristais arredondados de nitrato de potássio (**Figura 185**), cristais aciculares com um espectro compatível com o carbonato de sódio (**Figura 187**) e ainda cristais com secções hexagonais (uma maior ampliação pode ser vista em (**Figura 186a**)) com um espectro de sulfato de sódio e potássio (**Figura 186b**)).

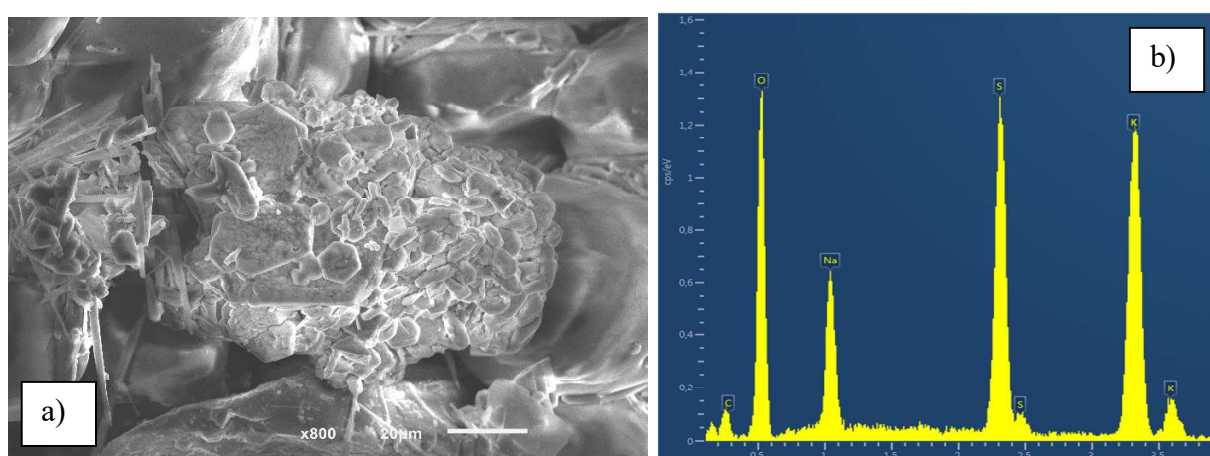


**Figura 185-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de nitrato de potássio, retirada da análise do provete do local 3.





**Figura 187-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de carbonato de sódio, retirada da análise do provete do local 3.



**Figura 186-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de sulfato de sódio e sulfato de potássio, retirada da análise do provete do local 3.

### 6.5.5. Local 4

Do local 4 (**Figura 189**), extraíram se uns possíveis sais, muito semelhantes aos retirados no local 3, existentes na superfície da alvenaria de granito, permitindo posteriormente a criação de um provete para a análise destes sais (**Figura 188**).

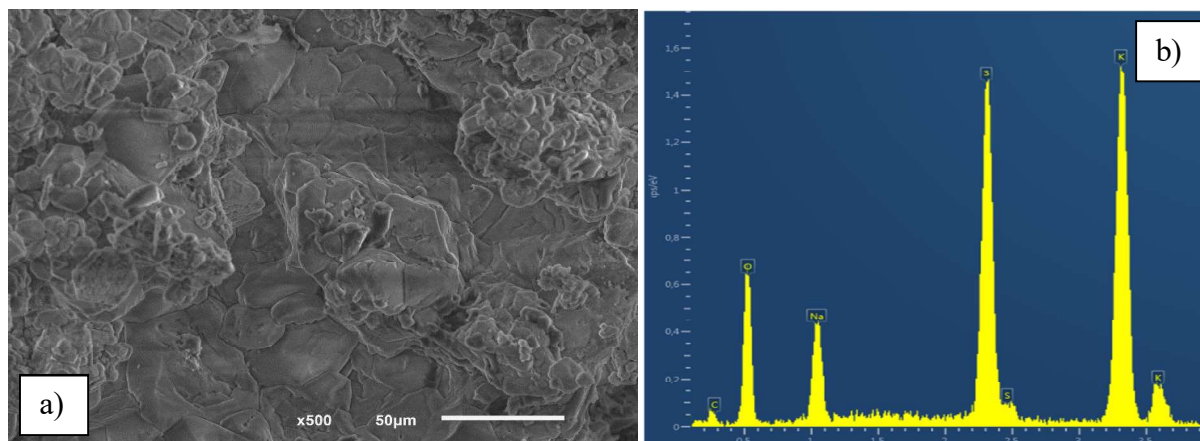


**Figura 189-** Local 4.



**Figura 188-** Provete de análise do local 4.

Na amostra do local 4 foi também possível detetar a existência de nitrato de potássio e de sulfatos alcalinos, como o sulfato de potássio (**Figura 190**) e o sulfato de sódio, sendo que, nesta amostra, os sulfatos são dominantes em relação aos nitratos.



**Figura 190-** Imagem MEV(a) e respectivo espectro(b) de cristais de sulfato de potássio, retirada da análise do provete do local 4.

### 6.5.6. Local 5

No local 5 (**Figura 192**), extraíram-se sais muito semelhantes aos retirados nos locais 3 e 4, existentes na superfície da alvenaria de granito, com a cor um pouco amarelada, que permitiram posteriormente a criação de um provete de ensaio para a análise destes sais (**Figura 191**).

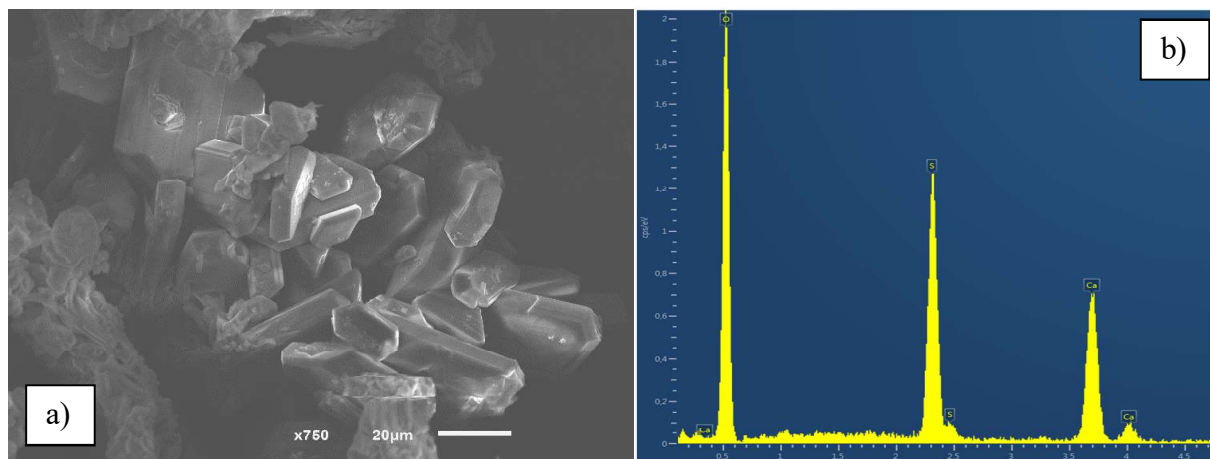


**Figura 192-** Local 5.



**Figura 191-** Provete de análise do local 5.

A análise da amostra retirada do local 5 revelou a presença de sulfato de potássio, sulfato de sódio e sulfato de cálcio (**Figura 193**). Na amostra não se detetou qualquer tipo de nitratos o que a distingue das amostras dos locais 3 e 4, tem em conta que são locais bastante próximos e pertencentes ao mesmo compartimento da porta.



**Figura 193-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de sulfato de cálcio na análise do provete do local 5.

### 6.5.7. Local 10

No local 10 (*Figura 195*), extraíram se sais muito semelhantes aos retirados nos locais 3, 4 e 5, existentes na superfície da alvenaria de granito, que permitiram posteriormente a criação de um provete de ensaio para a análise destes sais (*Figura 194*).

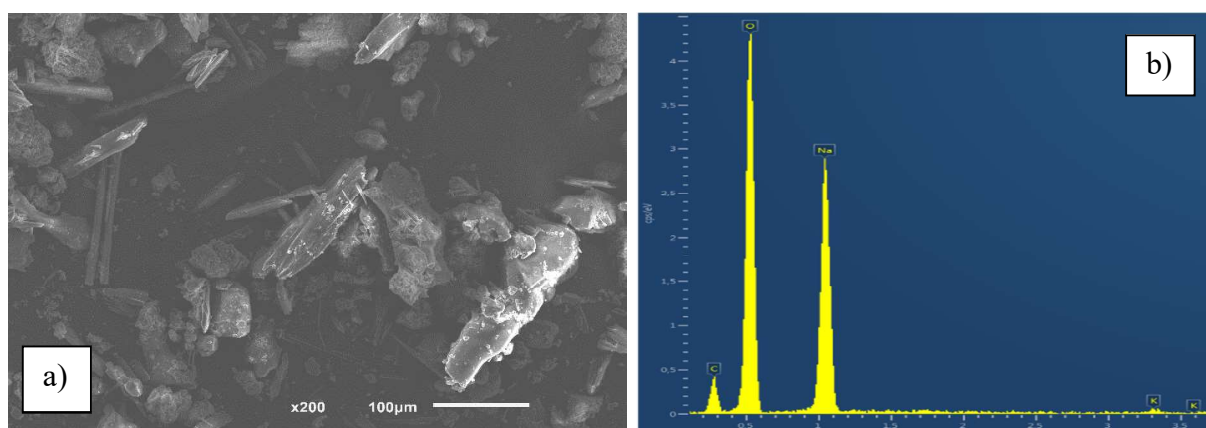


**Figura 195-** Local 10.



**Figura 194-** Provete de análise do local 10.

Os estudos por MEV mostraram a presença nesta amostra mostraram a presença dominante de carbonato de sódio (*Figura 196*) assim como a presença de nitrato de potássio e sulfatos alcalinos.



**Figura 196-** Imagem MEV: (a) e respectivo espectro; (b) da presença de carbonato de sódio da análise do provete do local 10.

### 6.5.8. Análise dos resultados

Os estudos por microscopia eletrônica de varrimento com microanálise permitiram estudar vários tipos de amostras, nomeadamente presumíveis produtos da alteração dos materiais. Entre estes merece destaque a confirmação da presença de sais solúveis em eflorescências. As eflorescências de sais solúveis são um problema essencialmente superficial, mas a sua presença sugere que as alvenarias poderão estar afetadas por contaminação salina. Essa contaminação salina pode em condições de secagem mais intensa como no caso das zonas mais ventiladas promover a cristalização de sais no interior do meio poroso dos materiais (Hammecker, 1995) causando, consequentemente, a erosão dos mesmos (como é observado em vários locais das portas da fortaleza). De acordo com as relações habitualmente indicadas (Arnold & Zehnder, (1991)), a presença de nitratos corresponderá a contribuições orgânicas associadas com plantas e animais, sendo comumente encontrados em edificações históricas (Moreno, Vilela, & Antunes, 2006). Já os sulfatos alcalinos são frequentemente associados com o uso de cimentos e são o tipo de sal mais comum nas construções recentes (Alves, 2013). Se bem que a proporção de sulfatos e nitratos mostra alguma variação, só um extenso e detalhado estudo das fases que ocorrem e da sua distribuição espacial permitiria uma discussão das contribuições e importância das possíveis fontes (ver exemplo em (Alves & M.A, 2000).

O papel de outras patologias, nomeadamente revestimentos de fosfatos e carbonatos não parecem ter um papel importante nos processos de deterioração física. Neste último caso, a sua presença poderá merecer alguma atenção por serem marcadores de infiltrações e circulação de soluções e podendo representar situações de lixiviação (Alves C. , 2010).

---

**6.6.****6.6. Conclusões**

A elaboração deste capítulo permitiu a obtenção de algumas propriedades mecânicas da argamassa e pedras recolhidas na Fortaleza de Almeida. Relativamente a resistência de compressão das pedras recolhidas, os valores obtidos foram bastante inferiores em comparação a outras pedras semelhantes exploradas perto da fortaleza. Porém, há que ter em conta que se trata de uma comparação de pedras degradadas com pedras sãs. No caso da argamassa, a resistência à compressão (cerca de 1.6 MPa) revela uma argamassa de qualidade razoável.

Os testes de sulfatos através de tiras colorimétricas, proporcionaram a confirmação de sulfatos nas amostras, onde apesar de ser um método pouco preciso a nível quantitativo de concentração de sulfatos revelou-se um método rápido e prático para a deteção da presença de sulfatos.

Por fim, a análise por MEV-EDE possibilitou confirmar a presença de sais solúveis em eflorescências, tais como sulfatos e nitratos, presença que poderá ter contribuído para a desmedida degradação da pedra que constitui as portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



## **CAPÍTULO 7. Conclusões e procedimento futuros/intervenções necessárias**

### **7.1. Conclusões**

A execução desta obra permitiu constatar que de entre os tipos de fortificações existentes (medievais, de transição e modernas), a Fortaleza de Almeida atualmente enquadra-se no tipo moderno, consequência do saber em projetar fortalezas dos militares daquela época, das funções que exerceu e ainda das inúmeras batalhas travadas. O estudo do edificado constituinte desta “estrela de pedra” possibilitou o conhecimento da tipologia das construções, de onde se destacaram as portas de São Francisco e Santo António, dada a sua arquitetura e construção de excelência, conjugada com uma implantação estratégica inovadora face a época em que foram executadas.

Para além do principal marco histórico de destruição/construção, o cerco a Almeida em agosto de 1810 durante a terceira invasão Francesa, o estudo de outros marcos históricos permitiu a identificação dos períodos de maior intensidade de reabilitação/construção e ainda o conhecimento dos materiais e tipologias construtivas utilizadas nas intervenções.

O estudo teórico sobre as alvenarias (propriedades e patologias) garantiu semanas de campo mais eficientes, uma vez que leitura estrutural das obras e identificação das anomalias foi realizada com maior aptidão e rigor. Relativamente ao estudo das técnicas de inspeção e diagnóstico possibilitou a escolha das técnicas e ensaios a realizar nas campanhas de campo fase ao material disponibilizado, bem como as condições, metodologia e locais mais adequados para amostragem.

O reconhecimento no local da geometria das portas da fortaleza confirmou a veracidade de todas as plantas fornecidas pela Câmara Municipal de Almeida, e ainda o conhecimento da constituição das paredes e secções de arco dos túneis de trânsito.

As portas estudadas revelaram a presença de anomalias em comum, a nível estrutural e ainda a não estrutural. As anomalias estruturais mais denotadas foram os assentamentos e as deformações no plano e para fora do plano. No caso das anomalias não estruturais em todas as portas visualizou-se a presença de manchas de humidade, presença de líquenes, musgos e

vegetação, florescências e, por último, a degradação superficial do granito, anomalia que requer especial atenção face ao estado de elevada degradação do granito nas portas.

A execução de ensaios sónicos permitiu o conhecimento das velocidades das ondas P e R e ainda a determinação dos módulos de elasticidade na alvenaria e na pedra existentes nas portas magistrais da fortaleza de Almeida. O conhecimento das velocidades de propagação permitiu a realização de ensaios impacto-eco, o que possibilitou o estudo da morfologia das paredes e outros elementos estruturais das portas magistrais que eram desconhecidos até à atualidade.

O levantamento com georadar, apesar de ser pouco determinante no caso da porta magistral de Santo António, devido a presença elevada de humidade, validou algumas espessuras e distâncias estimadas através dos ensaios de impacto-eco, o que atribui maior fiabilidade sobre os valores estimados.

O levantamento laser determinou a perda de material nas abóbadas dos túneis de trânsito das duas portas magistrais, desde a posição do arco original até à atualidade. Os resultados obtidos foram bastante consideráveis, visto que foram atingidas percentagens de desgaste nos arcos entre cinco e onze por cento, face a um arco com espessura de 40 cm. Estas percentagens revelam-se elevadas, pois o desgaste é maioritariamente nas zonas das juntas, fazendo com que em alguns locais os arcos apenas tenham uma zona de contacto de 10 cm na junta com extensão inicial de 40 cm.

Para a resistência de compressão das pedras recolhidas, os valores de obtidos foram bastante inferiores em comparação a outras pedras semelhantes exploradas perto da fortaleza. Porém, há que ter em conta que se trata de uma comparação de pedras degradadas com pedras sãs. No caso da argamassa, a resistência à compressão (cerca de 1.6 MPa) revela uma argamassa de qualidade razoável para o tipo de construção.

Os ensaios expeditos à presença de sulfatos através de tiras colorimétricas proporcionaram a deteção de sulfatos nas amostras, onde, apesar de ser um método pouco preciso ao nível quantitativo de concentração de sulfatos, revelou-se ser um método rápido e prático para a deteção da presença de sulfatos. Por último, a análise por MEV-EDE possibilitou confirmar a presença de sais solúveis em eflorescências, tais como sulfatos e nitratos, presença que poderá ter contribuído para a desmedida degradação da pedra que constitui as portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

Em suma, o estudo realizado nas portas magistrais permitiu concluir que apesar do elevado estado de degradação, principalmente nos granitos, as estruturas das portas não aparentam atualmente nenhum risco estrutural para os seus utilizador, uma vez que se tratam de construções bastante robustas. Porém tendo em conta que a degradação do granito tende a evoluir com o tempo, esta situação poderá representar, no futuro, um risco significativo para a estabilidade da estrutura. Tendo em vista minimizar estas anomalias e consolidar um pouco as estruturas das portas analisadas, na secção seguinte são recomendadas algumas futuras análises estruturais e ainda intervenções a realizar nas portas.

## **7.2. Procedimentos futuros e intervenções necessárias**

Uma vez que nesta obra não foi possível analisar por completo o comportamento estrutural das duas portas magistrais, deverá ser objeto em próximos trabalhos a execução de uma análise numérica da estrutura das duas portas magistrais, recorrendo a todos os resultados adquiridos nesta dissertação, de forma a estimar coeficientes de segurança para cada uma delas e assim poder garantir a segurança total de todos os utilizadores.

No caso das anomalias não estruturais de forma a eliminar/estabilizar os processos de deterioração, deverão ser executadas as seguintes trabalhos:

- 1º Fase- Eliminação da atividade biológica com aplicação de biocida e lavagem de todos os elementos e remoção de musgos, líquenes, vegetações, crostas e ainda florescências.
- 2º Fase- Impermeabilização das paredes com presença de humidade pelo exterior, apenas aquelas onde o acesso pelo exterior é possível.
- 3ª Fase- Remoção de todas as juntas com destacamento e consolidação de todas as juntas com ausência de argamassa.
- 4º Fase- Impregnação de repelente/selante de água em toda a alvenaria de pedra constituinte das portas.

Relativamente a primeira fase deverá ser realizada primeiramente a remoção das escorrências e vegetação através de meios não intrusivos para a alvenaria, com o devido cuidado de forma a provocar o mínimo de desgaste as faces do granito. Para a remoção de musgos e líquenes deverá ser utilizado um produto de limpeza de base aquosa com excelente capacidade de limpeza, quer em bases lisas, quer em bases porosas. Este produto de limpeza deverá também possuir:

- Boa capacidade de penetração e elevado poder de dispersão;
- Ser isento de solventes orgânicos e fosfatos;
- Não libertar vapores nocivos ou irritantes;
- Compatível com materiais de construção existentes: pedra natural e argamassas;
- Não descolora nem mancha os referidos materiais de construção;
- Não é considerado como biocida, segundo a directiva 98/8/EC;

Ainda na primeira fase, a lavagem deverá ser manual com escova de pelos macios (não metálicos), de forma a evitar perdas de material.

Na segunda fase, devese impermeabilizar todas as paredes onde é possível o acesso pelo exterior através de escavação mecânica é possível e não seja afetada a estabilidade da estrutural das mesmas. Na impermeabilização devese aplicar primeiramente uma barreira de vapor e só depois a aplicação de tela pitonada com geotêxtil. Após a aplicação da tela devese executar a drenagem de águas, através da aplicação de tubos de dreno com geotêxtil e das adequadas camadas de material britado. Por fim a reposição do terreno às cotas originais devese ser realizada com o devido cuidado perante os materiais aplicados e com compactação de sucessivas camadas de 20 cm de espessura.

Na fase de consolidação de todas as juntas da alvenaria devese retirar toda a argamassa degradada das juntas por meios mecânicos apropriados para se proceder à aplicação de argamassas à base de cal em todas as juntas de alvenaria. Antes da aplicação da argamassa, a superfície deve estar limpa, humedecida, saudável e livre de qualquer gordura. A argamassa a aplicar devese formular a partir de ligantes exclusivos à base de cal hidráulica natural, agregados siliciosos e calcários criteriosamente selecionados e possuir as seguintes características:

- Boa resistência à compressão;
- Fácil mistura e aplicação;
- Muito boa aderência à pedra;
- Classe W2 ou superior de capilaridade, segundo a norma EN 1015-18;
- Permeabilidade ao vapor de água inferior a 15, segundo a norma EN1015-19;
- Boa resistência aos ciclos gelo-degelo e aos sais do degelo;
- Boa resistência à abrasão;
- Não ser corrosivo, inflamável nem tóxico;

- Resistente aos sais;
- Acabamento a areado fino tradicional de cor bege;
- Isento de sulfato de cálcio;

Uma vez que a maioria das argamassas deste tipo existentes no mercado normalmente possuem reduzida impermeabilidade deverá ser aplicado um protetor de superfície hidrorrepelente do tipo impregnante de elevada qualidade de base polysiloxane. Este protetor deverá ser compatível com a argamassa, não reduzir as características mecânicas da argamassa, resistente ao U.V., preservar as condições de respirabilidade no substrato, impedir a capilaridade dos solutos poluentes e ainda possuir elevada durabilidade.

Por ultimo, na 4ª fase de reabilitação deverá ser aplicado material uma impregnação repelente de água monocomponente para superfícies absorventes, em todas as zonas constituintes de alvenaria de pedra. Este produto deve possuir as seguintes características:

- Reduzir a absorção de água por capilaridade;
- Reduzir o aparecimento de eflorescências;
- Diminuir a penetração de poeiras e impurezas nos poros superficiais;
- Possuir maior durabilidade e resistência que os tratamentos convencionais de base silicone;
- Não alterar o aspeto da superfície onde é aplicado;
- Reduzir a permeabilidade aos iões cloreto;
- Não formar barreira de vapor;

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



## Bibliografia

- Aldeias Históricas de Portugal . (2012). *Portas duplas de Santo Antonio*. Obtido de aldeiashistoricasdeportugal : <http://www.aldeiashistoricasdeportugal.com/o-que-ver/portas-duplas-de-santo-antonio>
- Aldeias Históricas de Portugal. (2012). CORPO DA GUARDA PRINCIPAL.
- Aldeias Históricas de Portugal. (2012). *Portas Duplas de Santo António*. Obtido de Aldeias Históricas de Portugal: <http://www.aldeiashistoricasdeportugal.com/o-que-ver/portas-duplas-de-santo-antonio>
- Aldeias Históricas de Portugal. (2012). *Portas duplas de São Francisco*. Obtido de <http://www.aldeiashistoricasdeportugal.com/o-que-ver/portas-duplas-de-sao-francisco-da-cruz>
- Aldeias Históricas de Portugal. (2012). *Revelim Doble*. Obtido de aldeiashistoricasdeportugal: <http://www.aldeiashistoricasdeportugal.com/o-que-ver/revelim-doble-hospital-de-sangue>
- Aldeias Históricas de Portugal. (2012). PICADEIRO D'EL REY.
- Almeida, C. M. (12 de 05 de 2015). *Localização de Almeida*. Obtido de Municipio de Almeida: <http://www.cm-almeida.pt/tudosobrealmeyda/localizacaoeacessos/Paginas/default.aspx>
- Amaral, S. F. (2013). *Inspeção e diagnóstico de edifícios recentes*. Lisboa.
- Andersen, T. (2009). A Paisagem de Almeida . Em J. C. (coord.), *ALMEIDA : Candidatura das fortificações abaluartadas da raia luso-espanhola a património mundial — UNESCO* (pp. 171-173). Almeida: Câmara Municipal De Almeida.
- Antunes, F. (2013). *disciplina*. Obtido de [www.estt.ipt.pt](http://www.estt.ipt.pt): [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1162\\_\\_T%C3%A9cnicasreabilitacao\\_alvenarias.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1162__T%C3%A9cnicasreabilitacao_alvenarias.pdf)
- Binda, L. (1993). Strengthening of masonries by injection technique. *Sixth North American Masonry Conference*, (pp. 1-15). Philadelphia.

- Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Em *Construction and Building Materials* (pp. 199-223). Elsevier.
- Branco, F., Brito, J. d., & Flores, I. (2005). *INSPECÇÃO E REABILITAÇÃO DE CONSTRUÇÕES EM ALVENARIA DE PEDRA*.
- Bravães, N. (2009). *Propriedades do Granito*.
- Campos, J. (2007). *As portas e portenas da praça-forte*. Câmara Municipal de Almeida.
- Campos, J. (2009). *Almeida: Candidatura das Fortificações Abaluartadas da Raia Luso-Espanhola a Património Mundial – UNESCO*. Almeida: Câmara Municipal de Almeida.
- Campos, J. (2009). Ficha de edificação das fortificações de Almeida. Em C. João Campos, *Candidatura das fortificações abaluartadas da raia luso-espanhola a património mundial – UNESCO* (pp. 21-33). Almeida: Câmara Municipal de Almeida.
- Campos, J. (2009). Sobre o desenho e a grandeza da obra de Almeida. Em c. João Campos, *ALMEIDA: Candidatura as fortificações abaluartadas da raia Luso-Espanhola a património mundial - UNESCO* (pp. 175-211). Almeida: Câmara Municipal de Almeida.
- Carocci, C. (2001). *Guidelines for the safety and preservation of histotical centres in seismic areas"*.
- Castela. (20 de Junho de 2007). Praça Alta-Almeida.
- Cóias, V. (2008). *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. IST - Instituto Superior Técnico.
- Dennisbluie. (12 de Julho de 2014). The Star Fortress of Almeida in Portugal.
- Falhas, S. (4 de Maio de 2009). *Aldeias historicas de Portugal*. Obtido de Blogspot.pt: <http://aldeiashistoricasdeportugal.blogspot.pt/2009/05/queda-de-um-castelo.html>
- Fernandes, F. M., & Lourenço, P. B. (2007). Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias. *Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional*.

- Fernandes, R. (2013). *estreladointerior*. Obtido de Casamatas: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!untitled/zoom/c17u5/imagev15>
- Fernandes, R. (2013). *Hospital de sangue*. Obtido de Estrela do interior: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!hospital-de-sangue--revelim-doble/cc77>
- Fernandes, R. (2013). *Igreja Matriz*. Obtido de Estrela do Interior: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!igreja-matriz/ccqg>
- Fernandes, R. (2013). *Posta duplas de Santo António*. Obtido de estrelado interior: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!portas-duplas-de-santo-antnio/c54i>
- Fernandes, R. (2013). *Praça Alta*. Obtido de Estrela do interior: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!praa-alta/cnub>
- Fernandes, R. (2013). *Torre de relógio*. Obtido de Estrela do interior: <http://estreladointerior.wix.com/almeida#!torre-do-relgio/cix4>
- Ferreira, R. (2011). *Reabilitação de um Edifício – Rua Azevedo Coutinho*. Porto.
- Ferreira, T. M., & Vicente, R. (2013). *Estratégias e processos de inspeção para avaliação e diagnóstico do património edificado*.
- Flores-Colen, I. (2008). *STAINS IN FACADES' RENDERING - DIAGNOSIS AND MAINTENANCE*.
- Fontes, F. (2009).
- Guimarães, M. (2009). *CARACTERIZAÇÃO DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA POR TÉCNICA SÓNICA*. Porto.
- Júlio, E. S. (2011). *Métodos de inspeção e diagnóstico*.
- Lopes, J. d. (Início Séc. XX). N.º 628 – Almeida – Quartel das Esquadras. Espinho.
- Noé, P. (2012). *Muralhas da Praça de Almeida*. Obtido de Monumentos: [http://www.monumentos.pt/Site/APP\\_PagesUser/SIPA.aspx?id=1382](http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=1382)
- Noé, P. (2014). *Guia de Inventário – Fortificações Medievais e Moderna*. IHRU, IP.

Novos Horizontes. (31 de Agosto de 2015). *Portas de São Francisco*. Obtido de Novos Horizontes: <http://novoshorizontes.blogs.sapo.pt/2015/08/31/>

Oliveira, V. (12 de 08 de 2012). Castelo de Melgaço - Portugal.

OZ. (2012). *Fichas* . Obtido de OZ- diagnóstico: <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20012.pdf>

Pedro, J. (2012).

Pereira, R. (2009). Obtido de [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br): <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfOasAA/fissuras-alvenarias>

Progenie. (2015). *ENSAIO DE ULTRA-SONS EM BETÃO*.

Ramos, L. F. (2014). Inspeção e diagnóstico da Fortaleza de Almeida . *Temas de dissertação 2014-2015*, (p. 25). Guimarães.

Ramos, L. F., & Lourenço, P. B. (2014). SA4: Inspection and Diagnosis – IN SITU NDT AND MDT.

Rodrigues, A. V. (2009). Importância cultural e estratégica de Almeida ao longo do tempo . Em J. C. (coord.), *ALMEIDA : Candidatura das fortificações abaluartadas da raia luso-espanhola a património mundial — UNESCO* (pp. 60-90). Almeida: Câmara Municipal de Almeida.

Roque, J. C. (2002). *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*.

Simões, V. (1999). A serra da Estrêla e as suas beiras. Lisboa.

Turísticas, R. (2015). Castelo de Almourol.

Valadares, P. H. (2014). *A TRATADÍSTICA DA ARQUITETURA MILITAR EUROPEIA COMO REFERÊNCIA PARA O RECIFE FORTIFICADO*.



# ANEXOS



## **Anexo 1- Listagem de intervenções na Fortaleza de Almeida**

## Intervenções na Praça-Forte

- Ano 1039 - Construção de um castro e posterior castelo muçulmano, conquistado anos mais tarde pelo reino de Leão e Castela;
- Ano 1297 - D. Dinis manda muralhar a vila e reconstruir/ampliar o castelo, após a conquista e posse definitiva de Almeida;
- Ano 1369 - O castelo é de novo ampliado por D. Fernando;
- Ano 1508, 9 de Setembro - Carta de D. Manuel a requerer a uma equipa de mestres-de-obras para avaliarem a obra e os seus materiais pelo retorno de 1.550 Reais;
- Ano 1510 - Registo dos desenhos do castelo realizados por Duarte d'Armas;
- Ano 1517 - Demolição de alguns edifícios na vila para a construção de um novo castelo;
- Ano 1640 - Após 80 anos de ruína progressiva das estruturas defensivas, procede-se a reparação apressada da fortaleza;
- Ano 1641 - D. Álvaro de Abranches ordenou a construção da Fortaleza, cabendo a direção das obras a João Saldanha e Sousa;
- Ano 1646 - Redução do recinto a fortificar;
- Ano 1658 - É mandado construir um hospital, durante a regência de D. Luísa Gusmão, com vista a reduzir o elevado número de feridos que se encontravam na Cadeia e na Casa da Câmara;
- Ano 1695 - Reconstrução e redefinição de elementos devido explosão no castelo;
- Ano 1744, julho até ano 1765, outubro - Obras orientadas pelo governador da praça Francisco Maclean, procedendo-se ao tapamento das cavidades abertas pelo inimigo, para colocação de minas, do flanco alto no baluarte de Santa Bárbara, no castelo, nas bermas e nas obras exteriores; reparação dos troços do reparo com brechas: construção de uma muralha de pedra e barro frente aos quartéis de infantaria, para sustentar as terras do terrapleno, que compreende parte do baluarte de São Pedro e parte da cortina das portas da Cruz;
- Ano 1766 - Preenchimento do intervalo entre a gola do baluarte de São Francisco e o convento e construção de duas rampas de acesso ao terrapleno desse baluarte; construção do paiol, em cantaria, sob essa zona e escada de acesso; construção de rampas de acesso ao terrapleno, entre os baluartes de São Pedro e de São João de Deus, com o revestimento parcial da escarpa interior;
- Ano 1776 - Obras na poterna do trem;
- Ano 1791 - Obras nas casamatas do baluarte de São João de Deus;
- Ano 1793, fevereiro - Início do desaterro da poterna junto ao baluarte de São João de Deus; 4 fevereiro - Início do revestimento a cantaria e cobertura em abóbada do baluarte de São João de Deus;
- Ano 1795 - Obras nos quartéis, visto que as chuvas impossibilitarem trabalhos de movimentação de terras;
- Ano 1796, 9 novembro - Anastácio de Sousa e Miranda ordena a demolição das latrinas existentes e construção de novas, em madeira, "por fora da muralha das cortinas"; suspensão das obras nos quartéis para aumentar as da fortificação;
- Ano 1797 - Abertura de canhoneiras em alguns flancos e faces dos baluartes; recomeço das obras na poterna junto ao baluarte de São João de Deus e construção de depósitos de pólvora; terraplanagem da esplanada entre os baluartes de Santo António e de São Pedro, corte de madeiras para a estacada do caminho coberto e telhado do trem; construção de armazéns para guarda de mantimentos, de paióis nos baluartes de São Pedro e de São Francisco e um de apoio aos baluartes de Santo António e de Nossa Senhora das Brotas;

- Ano 1804, outubro - Desentulhamento de parte das casamatas do cavaleiro do baluarte de São João de Deus, deixando à consideração superior o plano, perfil; estava entulhada e revestida a escarpa interior da cortina entre os baluartes de São João de Deus e de Santa Bárbara; construção de armazém no castelo;
- Ano 1812 - Reconstrução e restauro das zonas destruídas; como alternativa à porta da Cruz usa-se uma passagem através do fosso que subia ao baluarte de São Francisco e daí para dentro da vila; agosto - conclusão da reconstrução da estacada do caminho coberto; estavam quase completos os escarpamentos dos baluartes de São Pedro e de Santo António; trabalho nos baluartes de São Francisco e de Nossa Senhora das Brotas; reconstrução do revelim da Tasqueira; setembro / outubro;
- Ano 1813, 6 setembro - Beresford manda executar abóbada da poterna do baluarte de São Pedro, até encontrar o cano que dava saída das águas da praça para o fosso;
- Ano 1816 - Reparação de estragos causados pelo inverno e reparação dos parapeitos, canhoneiras dos flancos e das faces dos revelins e outras;
- Ano 1938 - Uma intervenção profunda realizada pela DGEMN, com trabalhos de limpeza e consolidação, escavação, demolição, desmontagem e remontagem de alvenarias existentes e colocação de nova argamassa de cal hidráulica e areia, na escarpa, alicerces, parapeitos e seu capeamento, degraus, guaritas e portas; proposta de colocação de novas portas nas casamatas e galeria do revelim Doble;
- Ano 1941 / 1942 - Demolição de paredes de alvenaria argamassada, escavações para sondagens, regularização de terrenos e destapamentos na esplanada de Santo António, em anexos encostados à porta interior de Santo António, picadeiro, parte norte do baluarte de São Francisco, rampas do baluarte do fosso entre os baluartes de São Francisco e de Santa Bárbara e entre os de Santo António e de São Pedro, nos muros de vedação do fosso junto ao Hospital do Sangue e aos baluartes de Nossa Senhora das Brotas e de São João de Deus, na barbacã arruinada do baluarte de São Pedro; construção em alvenaria de perpianho, com aproveitamento da pedra existente nas esplanadas de Santo António e de São Francisco, no baluarte do fosso junto aos baluartes de São Pedro e de Santo António e na praça alta;
- Ano 1943 - Início das sondagens e escavações dos alicerces do castelo medieval;
- Ano 1951 - Conclusão da reconstrução de parte da escarpa da face direita do revelim da Cruz;
- Ano 1962 - Conclusão do primeiro "Plano de Restauro e Valorização da Vila de Almeida", da autoria do arquiteto Amoroso Lopes;
- Ano 1962 / 1963 - Consolidação e reconstrução da cortina no revelim da Brecha;
- Ano 1963 - Arranjo dos pavimentos das rampas de acesso ao baluarte de São João de Deus, consolidação dos muros laterais, com refechamento das juntas e assentamento de calçada rústica; escavação e sondagem no baluarte; refechamento de juntas nos paramentos e substituição de alguns silhares; reparação, regularização e nivelamento de lajeados em várias salas abobadadas; construção de uma porta interior; desaterro das galerias desenvolvidas a partir de duas salas, consolidação e reconstrução dos seus degraus; construção da janela e portas exteriores; arranjo e beneficiação do pátio-jardim, incluindo consolidação de caleiras, tanque de água, limpeza do jardim e pavimentos térreos; instalação elétrica nas Casamatas;
- Ano 1964 - Escavações e sondagens no Castelo e construção de um dreno de granito para escoamento das águas pluviais; consolidação das cortinas entre os baluartes de São João de Deus e de São Francisco e no revelim de Santo António, com refechamento de juntas; construção e assentamento de parapeitos capeados; instalação elétrica das Casamatas;

- Ano 1965 - Escavações, sondagens e assentamento de cantaria para reconstituição dos panos de muralha do Castelo medieval; limpeza de paramentos de cantaria e dos terrenos dos fossos;
- Ano 1966 - Escavações, sondagens e escoramento de trincheiras no Castelo; reconstrução de duas guaritas no baluarte de Santa Bárbara; escavação e sondagem para descobrimento das fundações, reconstituição dos arranques da muralha e reconstrução do pano da cortina com paramentos de cantaria e enchimento de alvenaria no revelim e baluarte de Santo António e junto às portas da Cruz;
- Ano 1967 - Reconstrução de uma guarita no baluarte de São João de Deus;
- Ano 1969 - Desaterros e reconstrução de panos de muralha, demolição parcial do muro do cemitério e limpeza e arranque de vegetação no castelo; reparação da instalação elétrica das casamatas;
- Ano 1970 - Escavações para reconstituir a configuração do terreno exterior das muralhas do castelo e respetiva reconstrução; reconstrução das zonas limitantes dos fossos adjacentes;
- Ano 1971 - Escavações e reconstrução de panos de muralha na zona do castelo;
- Ano 1974 - Limpeza de vegetação na zona do castelo;
- Ano 1975 - Demolição de um quarteirão na Rua do Marvão para desafogo das cortinas;
- Ano 1977 - Limpeza e consolidação de alguns panos de muralha
- Ano 1979 - Execução de túnel em betão na muralha do revelim Doble, desaterros e rebaixamentos dos arruamentos no interior da praça; levantamento do paramento da cortina;
- Ano 1980 - Abertura de vão na cortina junto ao baluarte São João de Deus, com 6 m de largura e 5,80 m de altura, originando fendas na mesma e forte desaprumo dos paramentos do lado esquerdo da escarpa interior; acesso intramuros e reconstrução de cortinas na proximidade do revelim Doble;
- Ano 1982 - Rebaixamento do pavimento do túnel, consolidação da face interna da cortina, execução de capeamento nos paramentos do adarve, refechamento de juntas e limpeza de ervas e arranque de figueiras bravas, nas proximidades do revelim Doble;
- Ano 1984/1985 - Destruição do paramento desalinhado junto ao revelim Doble, execução da fundação da cortina a reconstruir, reconstrução do paramento reutilizando a cantaria e reforço do betão ciclópico; reposição de terras removidas; recuperação da praça alta, praça baixa, plataforma para lançamento de morteiros e restantes paramentos do reparo contíguos;
- Ano 1985/1986 - Refechamento de juntas, reconstrução de diversos troços da cortina e reposição de silhares em falta na proximidade do baluarte de Santa Bárbara;
- Ano 1987 - Levantamento de pedras da cobertura da galeria subterrânea e sua limpeza, recuperação de apoios para assentamento da cobertura, colocação de lajedo de granito para reconstrução da mesma, construção do aterro sobre esses lajedos em camadas compactadas e tratamento de cantarias, com refechamento de fendas e limpeza do baluarte de São Pedro;
- Ano 1995/1996/1997- Recuperação do picadeiro; beneficiação das Casamatas do baluarte de São João de Deus, com recuperação das coberturas, impermeabilização e drenagem pluvial (IPPAR);
- Ano 1998/1999 - Iluminação da fortificação, com projeto do Eng. Domingos Cardoso;
- Ano 1999 - Reparação da casamata, para evitar as infiltrações, cobrindo parcialmente a estrutura com terra;

- Ano 2006/2007 - Conclusão do arranjo da zona fronteira ao antigo Hospital do Sangue; reconfiguração da porta nova; execução de instalações sanitárias e um palco para espetáculos; ligação entre os fossos; desumidificação das Casamatas.

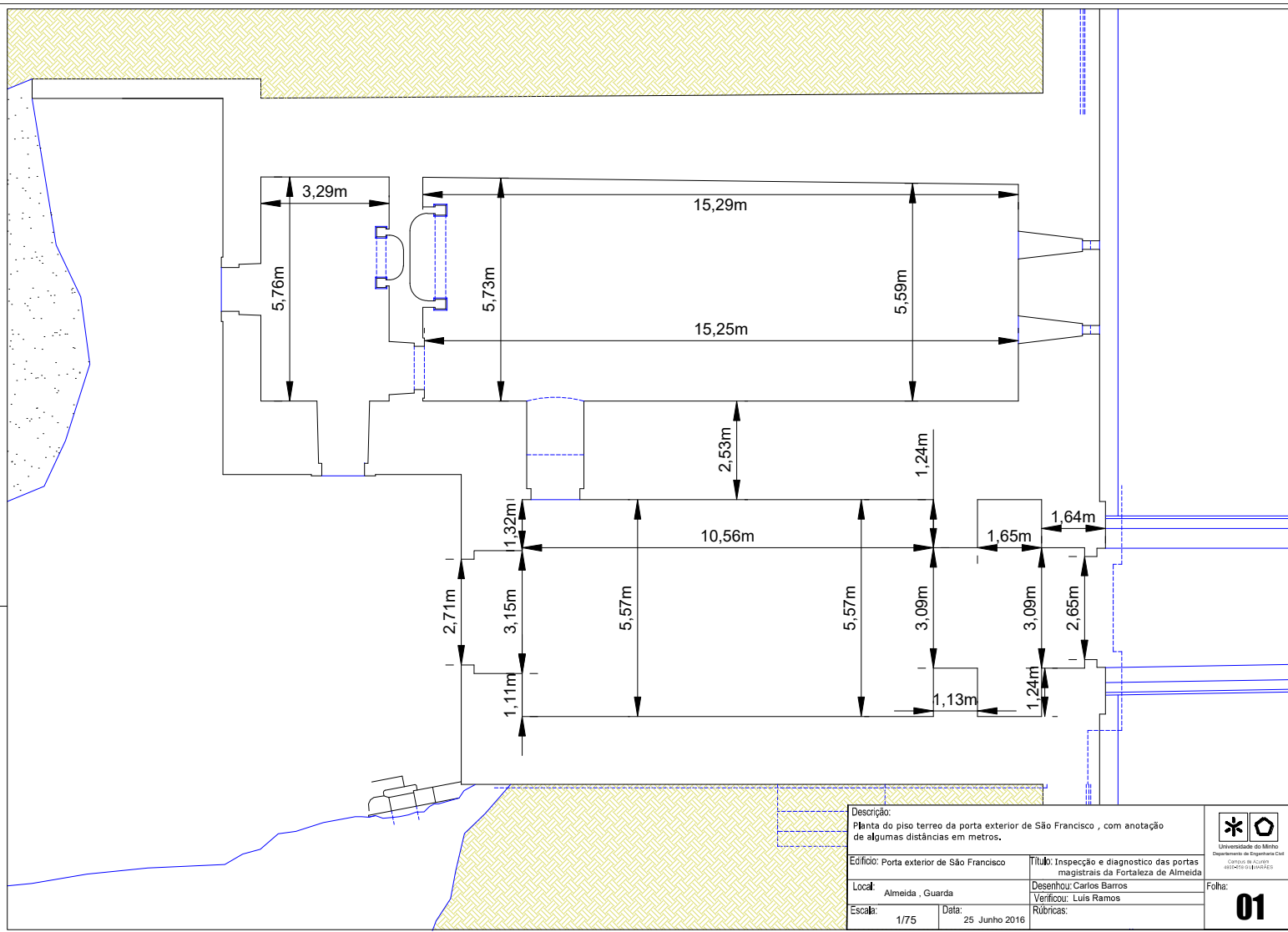
### **Intervenções nas portas da Praça-Forte**

- Ano 1645 - Construção das portas de S. Francisco, por Pierre Garsin;
- Ano 1661 até 1676 - Construção das portas de Santo António;
- Ano 1738 - Obras nas abóbadas das portas da Cruz e casa da guarda adjacente devido à destruição durante a guerra;
- Ano 1744 até ano 1765 - Obras na cortina da porta de Santo António; reparação dos parapeitos e abertas canhoelras no baluarte de Santo António; reconstrução do armazém de pólvora no baluarte de Santo António; reedificação da porta da Cruz e da ponte levadiça; alteração do sistema de içamento da ponte levadiça da porta magistral da Cruz;
- Ano 1773 - Obras na porta do revelim de Santo António;
- Ano 1777 - Construção de latrinas nas portas;
- Ano 1787 - Obras na casa da guarda da porta magistral da Cruz;
- Ano 1790 até ano 1791 - Obras na porta do revelim da Cruz;
- Ano 1791 - Obras na porta do revelim de Santo António e na prisão da respetiva porta magistral; obras noutras portas, com assentamento de lajedo, levantamento de paredes interiores, formação de latrinas e chaminés;
- Ano 1791 - Construção dos meios pisos nas casas da guarda das portas de Santo António e no trânsito da magistral, com abertura de novas janelas e reforma das existentes; alteração do sistema de içamento das pontes levadiças;
- Ano 1801 - Conclusão das obras da casa da guarda da porta do revelim da Cruz;
- Ano 1812 - Engrossamento dos parapeitos das cortinas destruídas e reparação lateral da porta da Cruz;
- Ano 1815 - Construção de uma rampa da porta magistral da Cruz para o fosso;
- Ano 1824 - Reparação da ponte da porta de São Francisco;
- Ano 1826 - Substituição da porta exterior do paiol do revelim das portas de Santo António;
- Ano 1825 - Adaptação das pontes levadiças a pontes fixas de alvenaria, projetadas pelo engenheiro Casimiro José Fernandes;
- Ano 1826 - Reparação do "cancelão da avançada das Portas da Cruz";
- Ano 1888 - Execução das pontes da porta de Santo António;
- Ano 1939 - Ordena-se a demolição de anexos encostados à porta interior de Santo António;
- Ano 1941 até ano 1942 - Construção em cantaria a pico grosso nas portas de São Francisco, nas portas de Santo António, esplanadas de Santo António e de São Francisco, parte norte do baluarte de São Francisco; construção em cantaria a pico fino em cornija nas portas de Santo António e de São Francisco; levantamento e assentamento de lajedo de cantaria com perfurações cilíndricas nas portas de Santo António e de São Francisco; remoção e reposição de cantarias das abóbadas das portas de Santo António e de São Francisco; limpeza geral de cantarias na primeira linha de infantaria, fosso e cortina principal;
- Ano 1942 - Reconstrução parcial do remate da porta de Santo António e seu posto de vigia cilíndrico, com execução de parapeitos e limpeza da cantaria;

- Ano 1963 - Reconstrução de cortinas em cantaria no revelim de Santo António; reconstrução das escadas sobre as portas da Cruz; escavações, sondagens e identificação de uma sala abobadada no baluarte de São Francisco;
- Ano 1966 - Conclusão da reconstrução do troço da cortina com paramentos de silharia de cantaria no revelim e baluarte de Santo António;
- Ano 1966 - Limpeza dos paramentos e parte do terreno do fosso, junto às portas de Santo António;
- Ano 1967 - Limpeza de cantarias e do terreno na base da cortina, reconstrução de troço da cortina e de rampa de acesso em terra, revestimento de calçada de pedra grande e regularização dos terrenos nas proximidades das portas da Cruz;
- Ano 1970 - Requalificação e calcetamento das rampas de acesso aos fossos exteriores e reparação das paredes limitantes nos acessos à porta da Cruz;
- Ano 1971 - Extração de vegetação e consolidação de cantarias na porta da Cruz e baluarte de Santo António; reconstrução das portas de madeira;
- Ano 1974 - Levantamento e reconstrução das guardas, sapata e lajes de passadeira do pontão da porta de São Francisco, demolição e reconstrução da parede limitante em alvenaria;
- Ano 1978 - Construção de guarda em alvenaria e grade de ferro na escada e levantamento da guia central e das faixas centrais do pontão das portas de São Francisco;
- Ano 1979 - Reassentamento da guia central e calçada das faixas laterais do pontão das portas de Santo António;
- Ano 1980 - Colocação de caixilharias nos vãos exteriores e instalação da rede elétrica no revelim da Cruz;
- Ano 1986 - Refechamento de juntas, beneficiação da cobertura nas portas de São Francisco; conservação na porta magistral da Cruz, nomeadamente na cobertura e trânsito;
- Ano 1987 - Encerramento ao trânsito da ponte dormente da porta magistral de Santo António;
- Ano 1992 - Adaptação do compartimento da porta magistral da Cruz a posto de turismo, com construção de instalações sanitárias, substituição do pavimento, colocação de novas caixilharias, instalação de infraestruturas (água, esgoto, eletricidade), impermeabilização da cobertura e parede enterrada e limpeza da cantaria interior; limpeza geral da vegetação; arranjo de uma faixa da esplanada à entrada da porta da Cruz;
- Ano 1995 até ano 1997 - obras no revelim doble, na casa da guarda da porta do revelim da Cruz e na casa da guarda da porta magistral de Santo António (IPPAR); impermeabilização da cobertura da porta exterior de São Francisco com refechamentos interiores e exteriores de pedra sob pressão, injeção e caldas orgânicas em função da concentração de infiltrações e injeção de caldas inorgânicas de baixo teor em hidróxido de cálcio;
- Ano 2002- Recuperação dos espaços interiores das portas magistrais, destinados a atividades de receção e convívio promovidas pelo Município de Almeida;
- Ano 2007- reforma das salas da porta de Santo António, adaptando-as para instalar um “Centro de Estudos de Arquitetura Militar.



## **Anexo 2- Levantamento geométrico e fotogramétrico.**



Descrição:  
Planta do piso terreo da porta exterior de São Francisco , com anotação de algumas distâncias em metros.

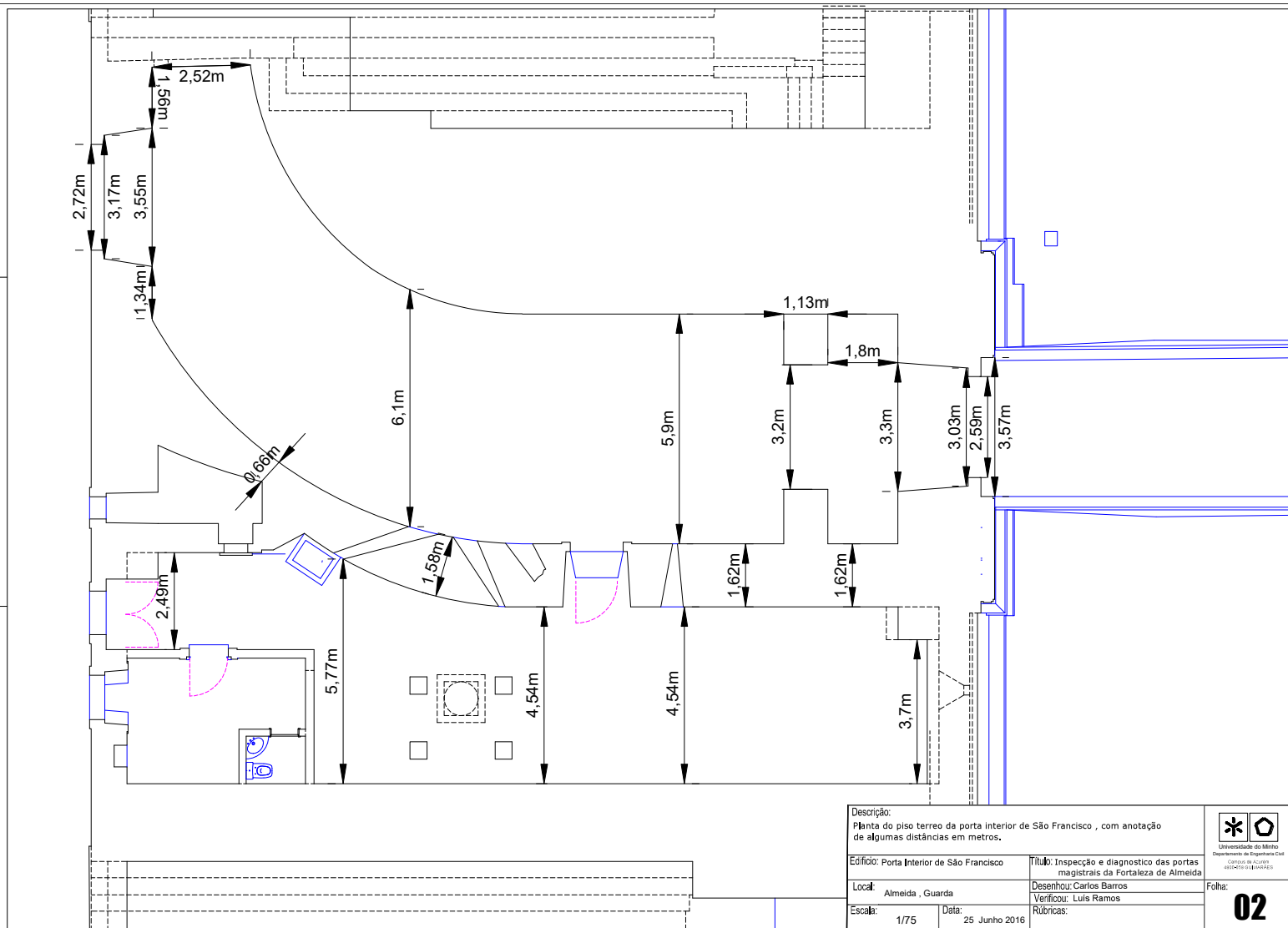
Edifício: Porta exterior de São Francisco		Título: Inspeção e diagnostico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros	
Escala: 1/75	Data: 25 Junho 2016	Verificou: Luis Ramos
		Rúbricas:



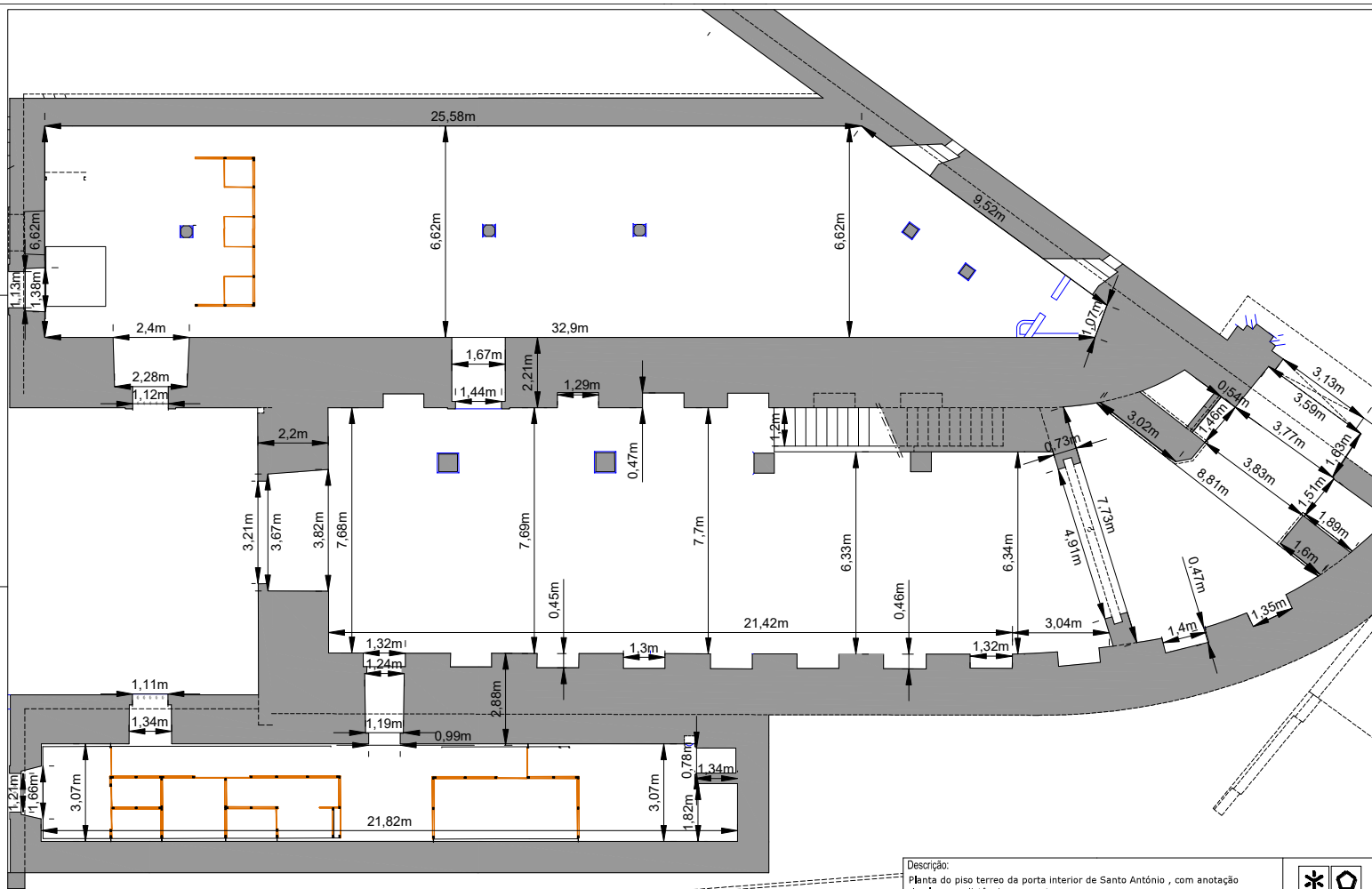
Universidade do Azores  
Faculdade de Engenharia


Centro de Estudos e Investigações

01



Descrição: Planta do piso terreo da porta interior de São Francisco , com anotação de algumas distâncias em metros.		<div><div><div></div><div></div></div><div>Universidade do Minho</div><div>Departamento de Engenharia Civil</div><div>CARLOS DE ALMEIDA</div><div>ARQUITETO E BARRISTER</div></div>
Edifício: Porta Interior de São Francisco	Título: Inspeção e diagnostico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros	
Escala: 1/75	Data: 25 Junho 2016	
Verificou: Luis Ramos		Folha: 02
Rúbricas:		



Descrição: Planta do piso terreo da porta interior de Santo António , com anotação de algumas distâncias em metros.		 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil CENTRO DE INVEST. EM ENGENHARIA
Edifício: Porta Interior de Santo António	Título: Inspeção e diagnostico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros	
Escala: 1/100	Verificou: Luis Ramos	
Data: 25 Junho 2016		Folha: 03



Descrição: Fachada principal da porta magistral de S. Francisco, obtida por fotogrametria.	
Edifício: Porta Interior de São Francisco	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros
Escala: 1/100	Verificou: Luis Ramos
Data: 25 Agosto 2016	
Rúbricas:	



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Apoio  
à Qualidade da Construção

Folha:  
**04**



Descrição: Fachada principal da porta magistral de S. António, obtida por fotogrametria.	
Edifício: Porta Interior de Santo António	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros
Escala: 1/100	Verificou: Luis Ramos
Data: 25 Agosto 2016	
Rúbricas:	

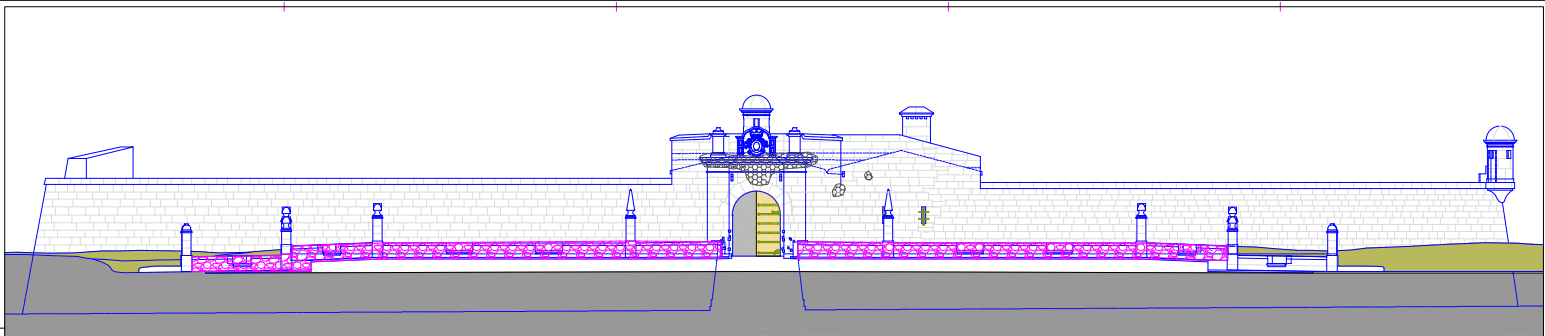


Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Apoio  
à Qualidade da Construção

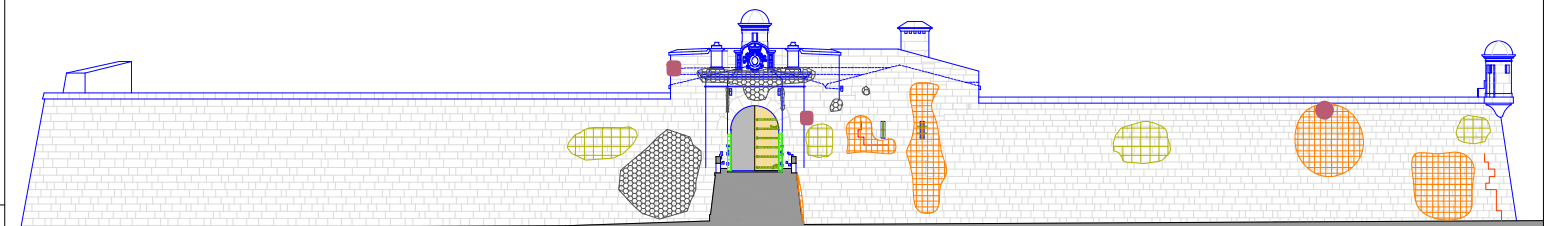
Folha:  
**05**



### **Anexo 3- Mapeamento de anomalias nas portas**



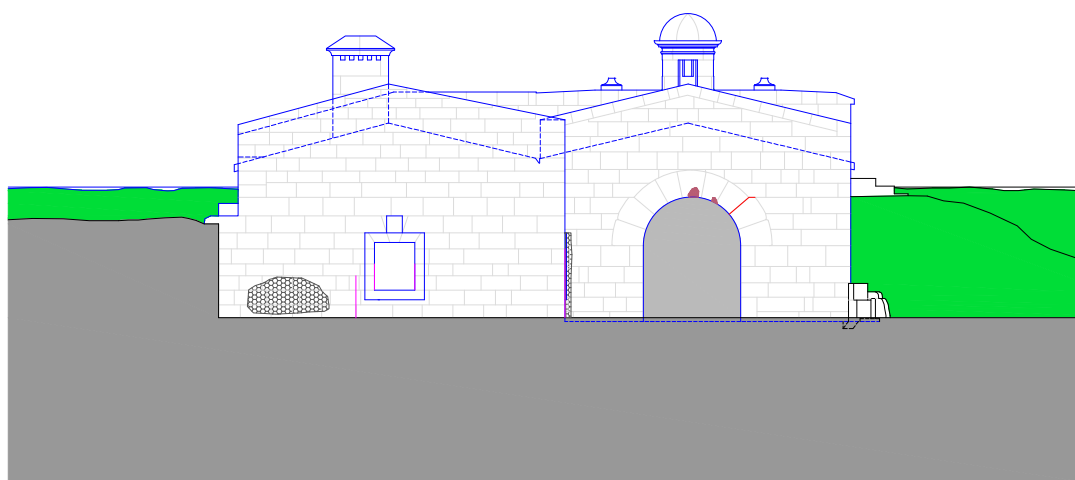
ALDO FELIX EPIFANIO



ALDO FELIX EPIFANIO

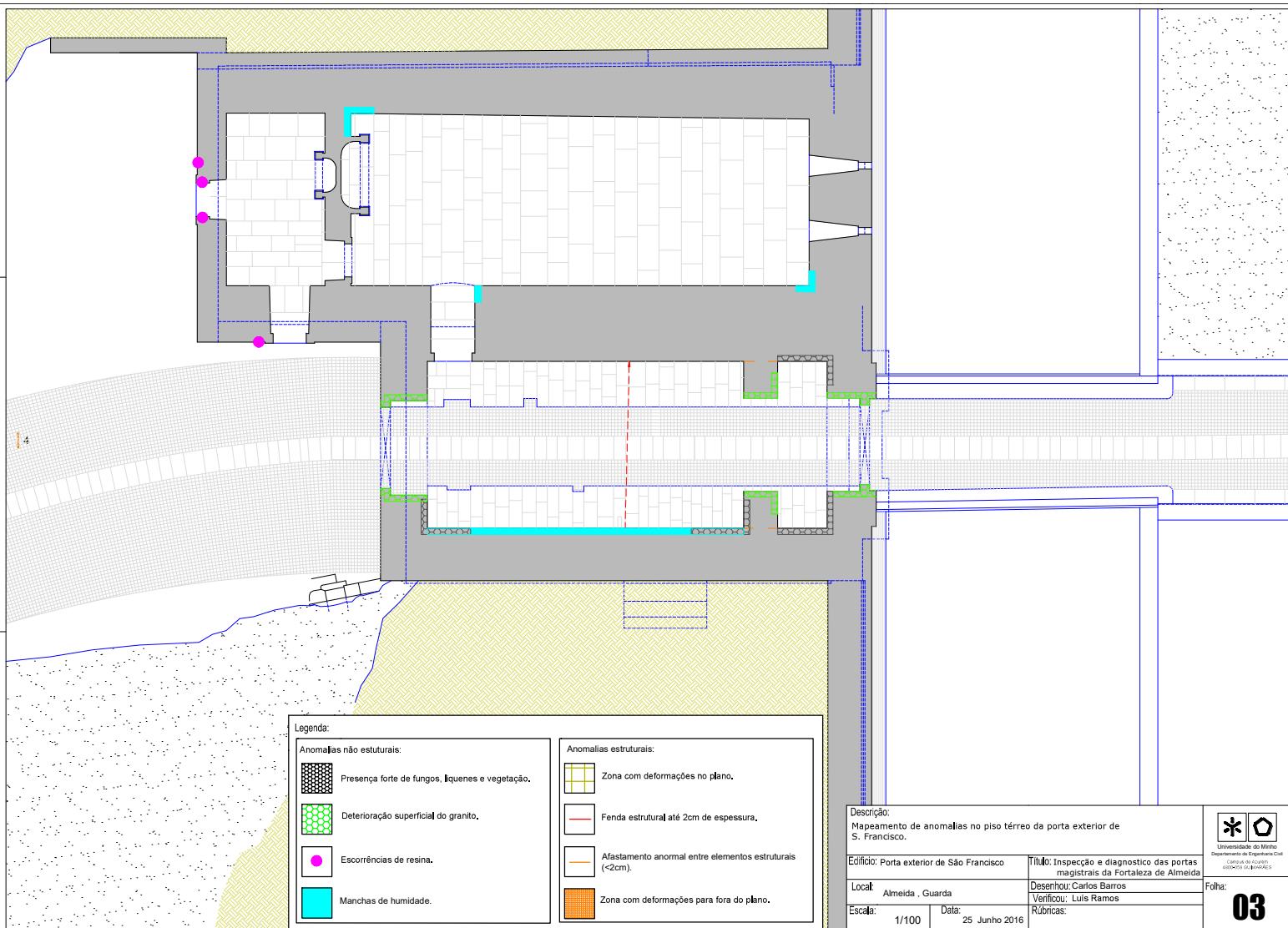
Legenda:	
Anomalias não estruturais:	
	Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.
	Deterioração superficial do granito.
	Zona de alvenaria com ausência total de argamassa.
	Marcas de antigos combates.
Anomalias estruturais:	
	Zona com deformações no plano.
	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
	Zona com deformações para fora do plano.

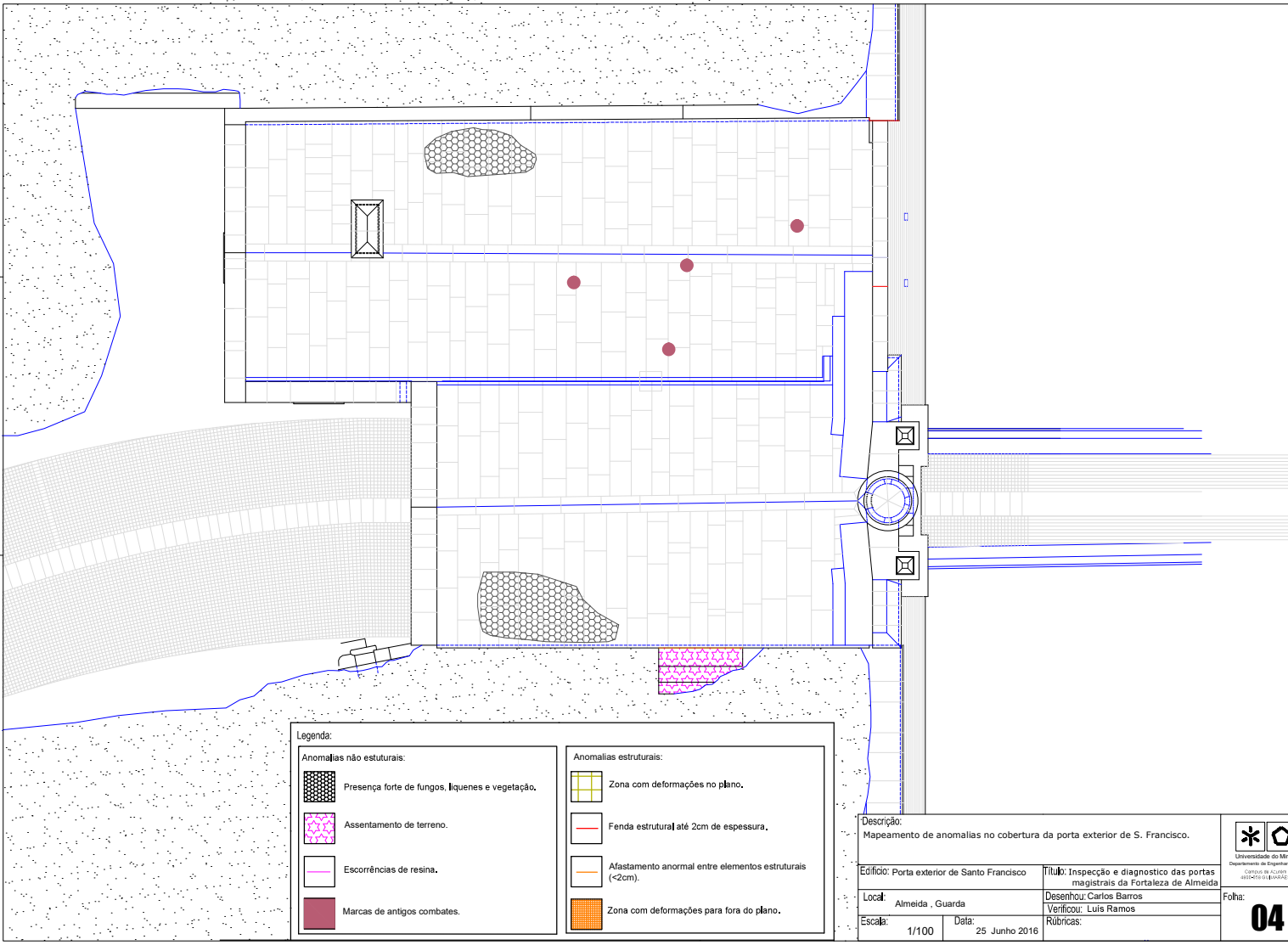
Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado principal da porta exterior de S. Francisco.		 Universidade do Açores Departamento de Engenharia Civil CENTRO DE INVESTIGACAO E INOVACAO
Edifício: Porta Exterior de Santo Francisco	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros	Folha: <b>01</b>
Escala: 1/200	Data: 25 Junho 2016	
	Rúbricas:	

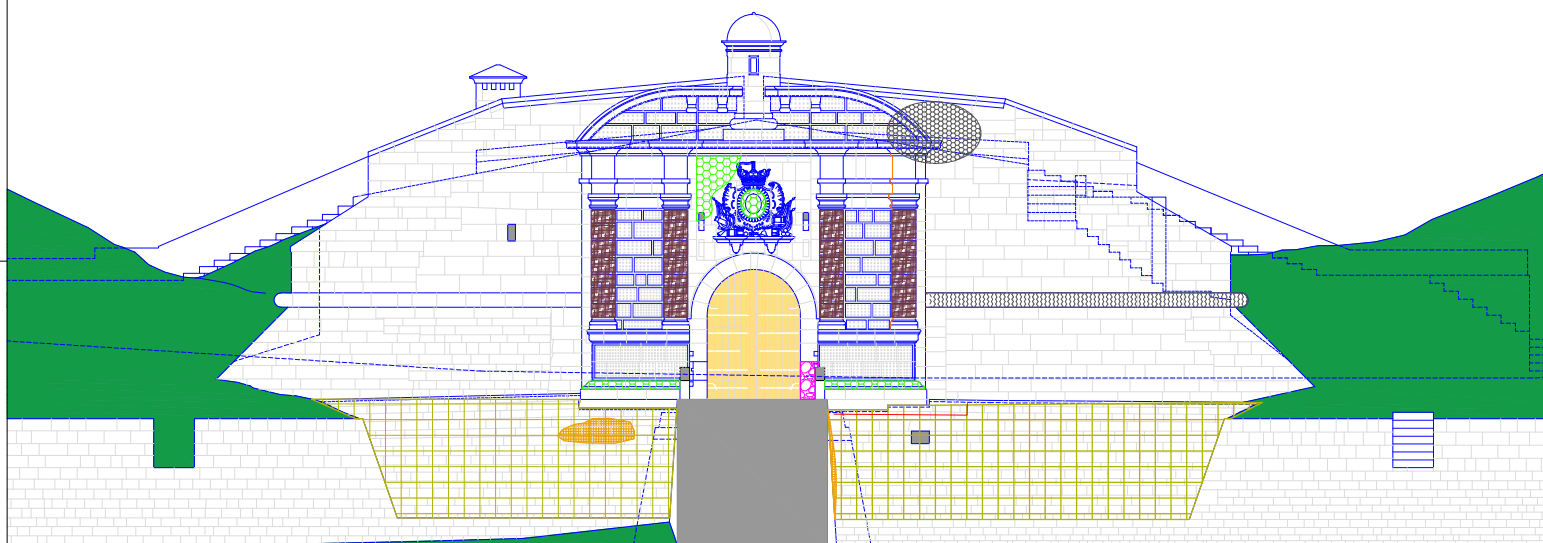


Legenda:	
Anomalias não estruturais:	Anomalias estruturais:
Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.	Zona com deformações no plano.
Deterioração superficial do granito.	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
Escorrências de resina.	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
Marcas de antigos combates.	Zona com deformações para fora do plano.

Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado posterior da porta exterior de S. Francisco.		
Edifício: Porta exterior de São Francisco Local: Almeida, Guarda Escala: 1/100	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida Desenhou: Carlos Barros Verificou: Luís Ramos Data: 25 Junho 2016 Rubricas:	Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Centro de Estudos e Investigação Científica Folia: <b>02</b>



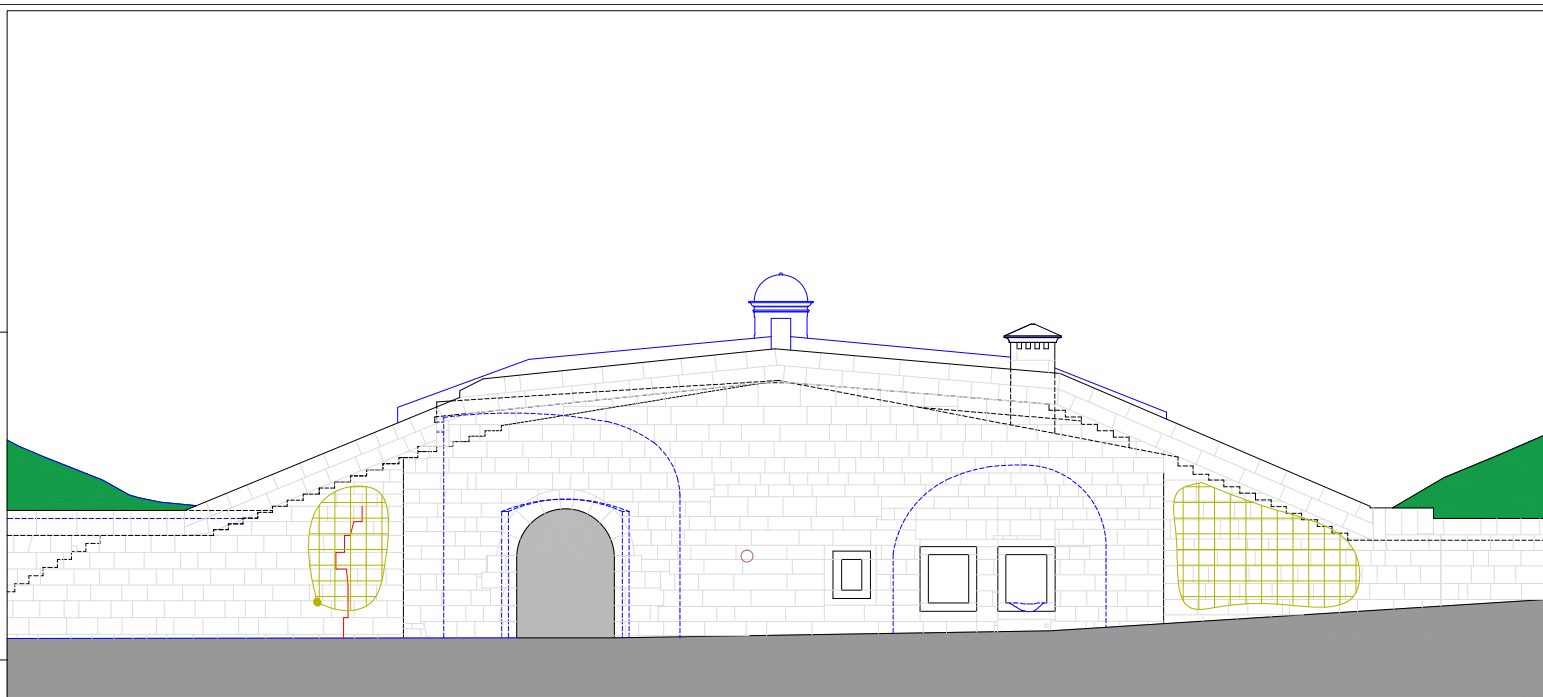




Legenda:	
Anomalias não estruturais:	
	Fungos, líquenes e vegetação.
	Deterioração superficial do granito.
	Zona de alvenaria com ausência total de argamassa.
	Elementos de restauro degradados.
Anomalias estruturais:	
	Zona com deformações no plano.
	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
	Zona com deformações para fora do plano.

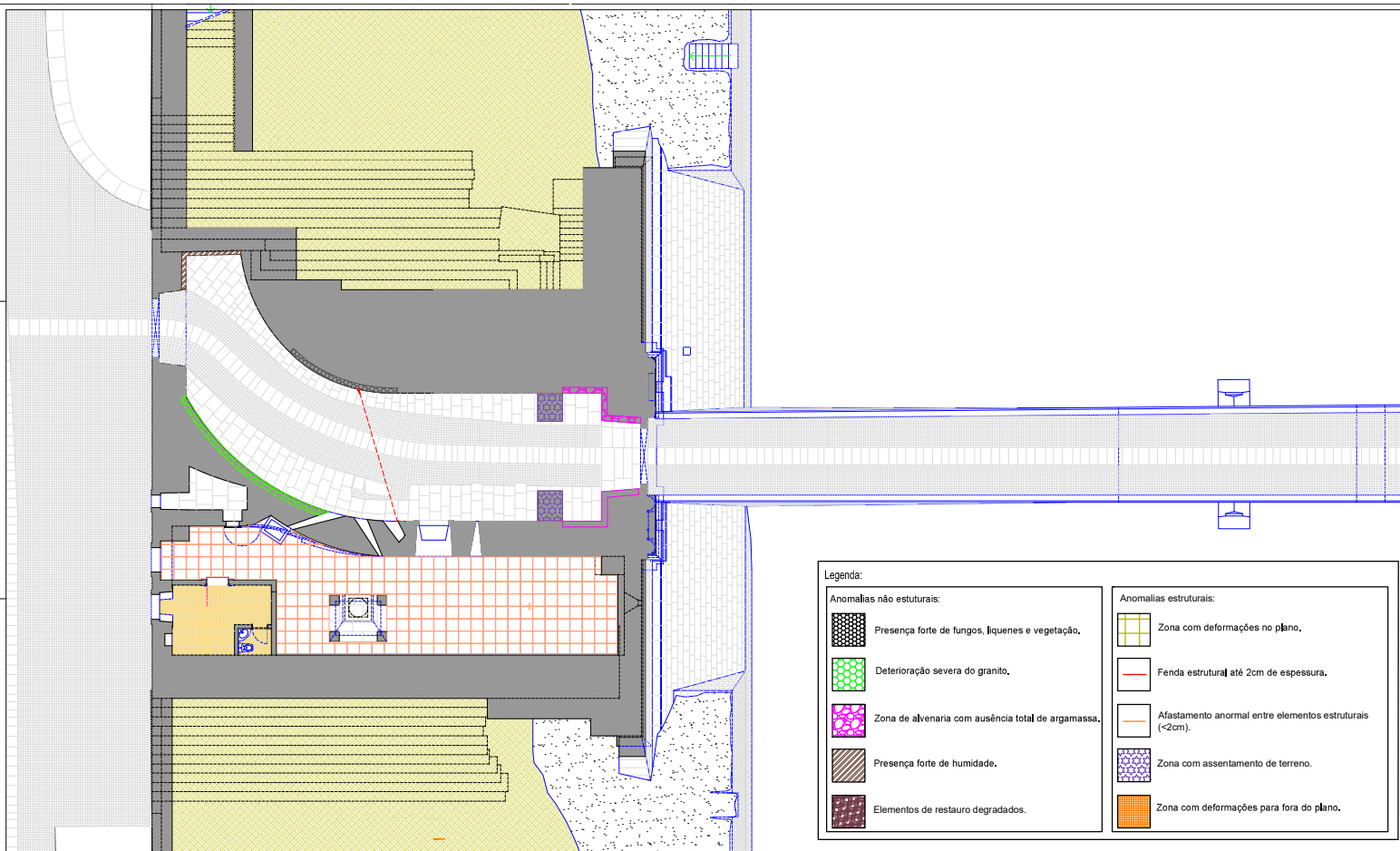
Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado principal da porta magistral de S. Francisco.			
Edifício: Porta Interior de São Francisco		Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda		Desenhou: Carlos Barros	
Escala: 1/100		Verificou: Luís Ramos	
Data: 25 Junho 2016		Rubricas:	
			Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Centro de Apoio GEOTECNIA E BARRAGENS
			Folha: <b>05</b>





Legenda:	
Anomalias não estruturais:	
	Fungos, líquenes e vegetação.
	Deterioração superficial do granito.
	Zona de alvenaria com ausência total de argamassa.
	Marcas de antigos combates.
	Elementos de restauro degradados.
Anomalias estruturais:	
	Zona com deformações no plano.
	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
	Zona com deformações para fora do plano.

Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado posterior da porta magistral de S. Francisco.		 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Engenharia
Edifício: Porta Interior de São Francisco	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros	Folha: <b>06</b>
Escala: 1/100	Data: 25 Junho 2016	
	Rubricas:	



Legenda:

Anomalias não estruturais:

- Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.
- Deterioração severa do granito.
- Zona de alvenaria com ausência total de argamassa.
- Presença forte de humidade.
- Elementos de restauro degradados.

Anomalias estruturais:

- Zona com deformações no plano.
- Fenda estrutural até 2cm de espessura.
- Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
- Zona com assentamento de terreno.
- Zona com deformações para fora do plano.

Descrição:  
Mapeamento de anomalias no interior da porta magistral de S. Francisco.

Edifício: Porta Interior de São Francisco

Local: Almeida, Guarda

Escala: 1/150

Data: 25 Junho 2016

Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

Rúbricas:

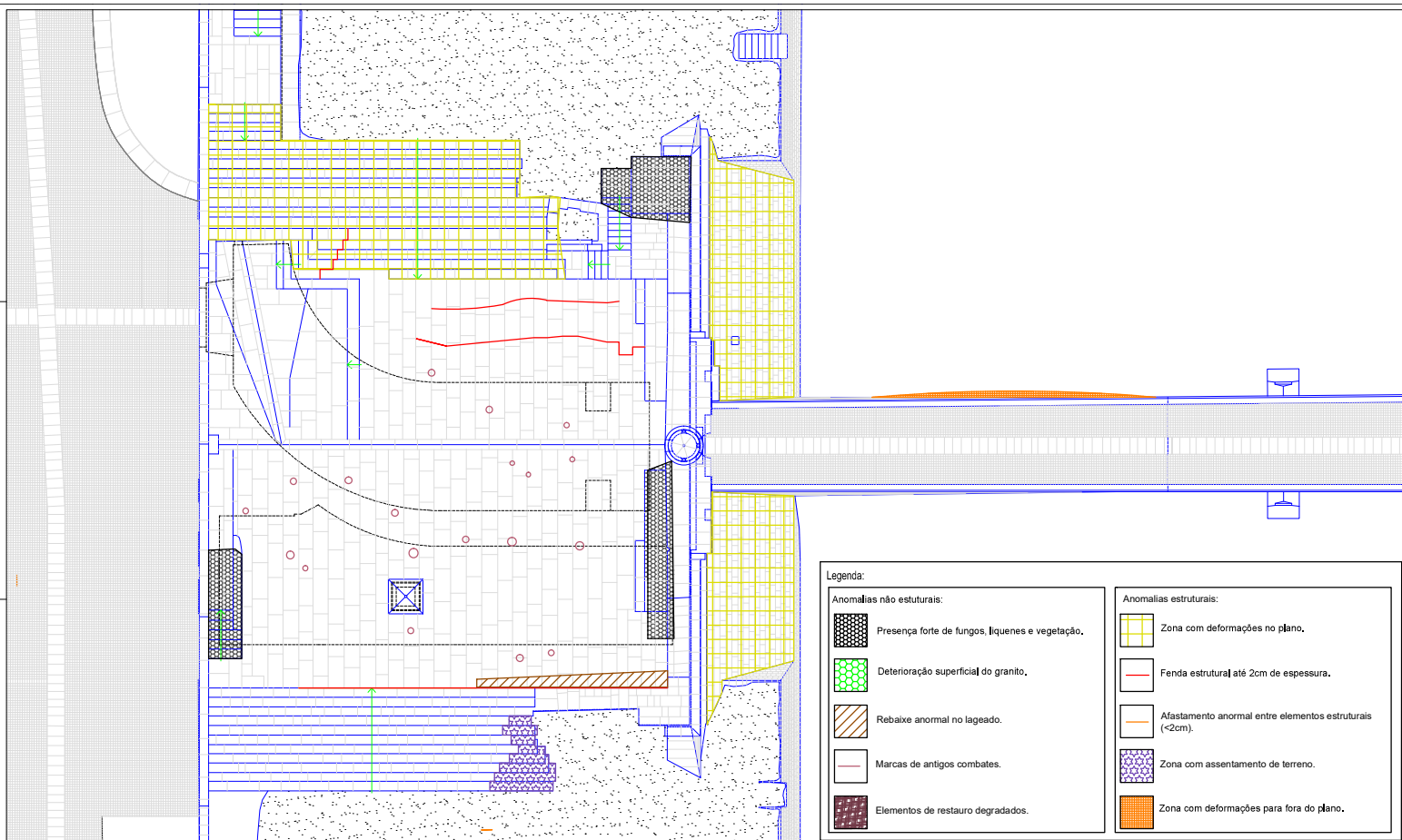


Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil

Centro de Estudos e Investigação

em Engenharia de Estruturas

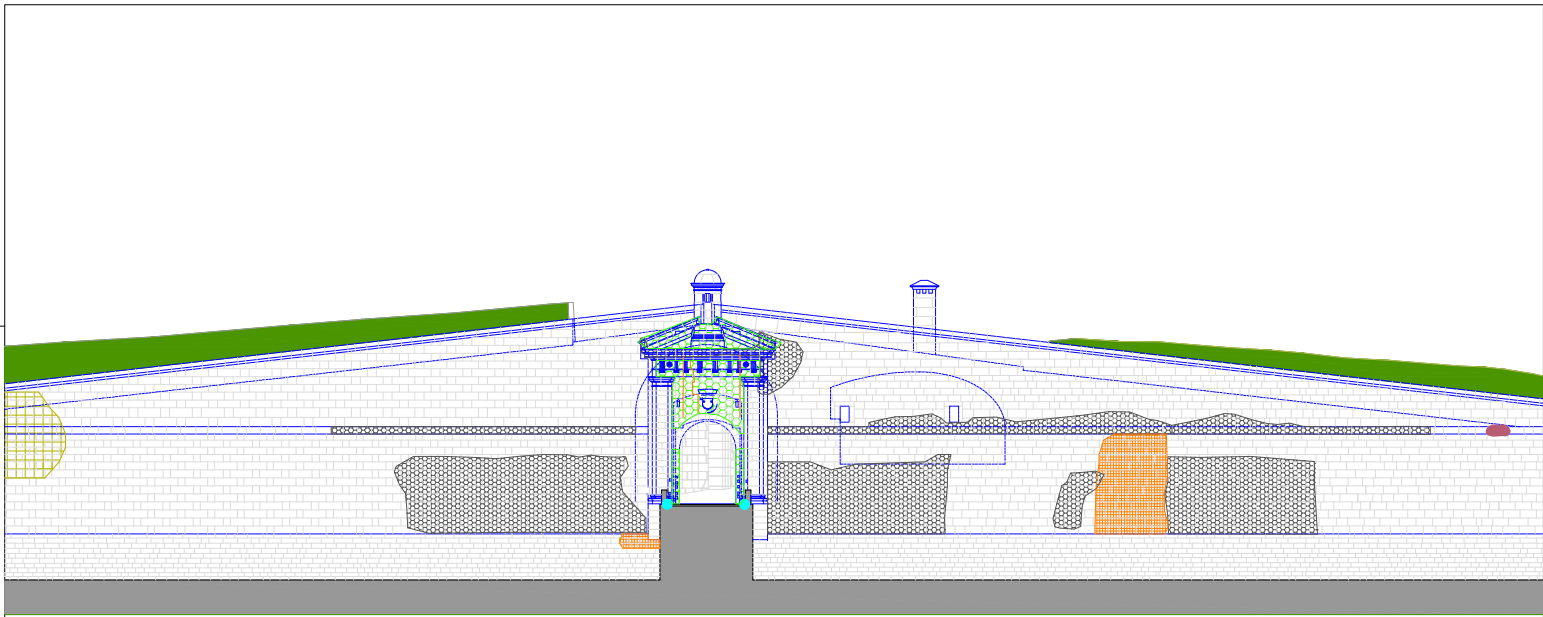
Folha: 07



Legenda:

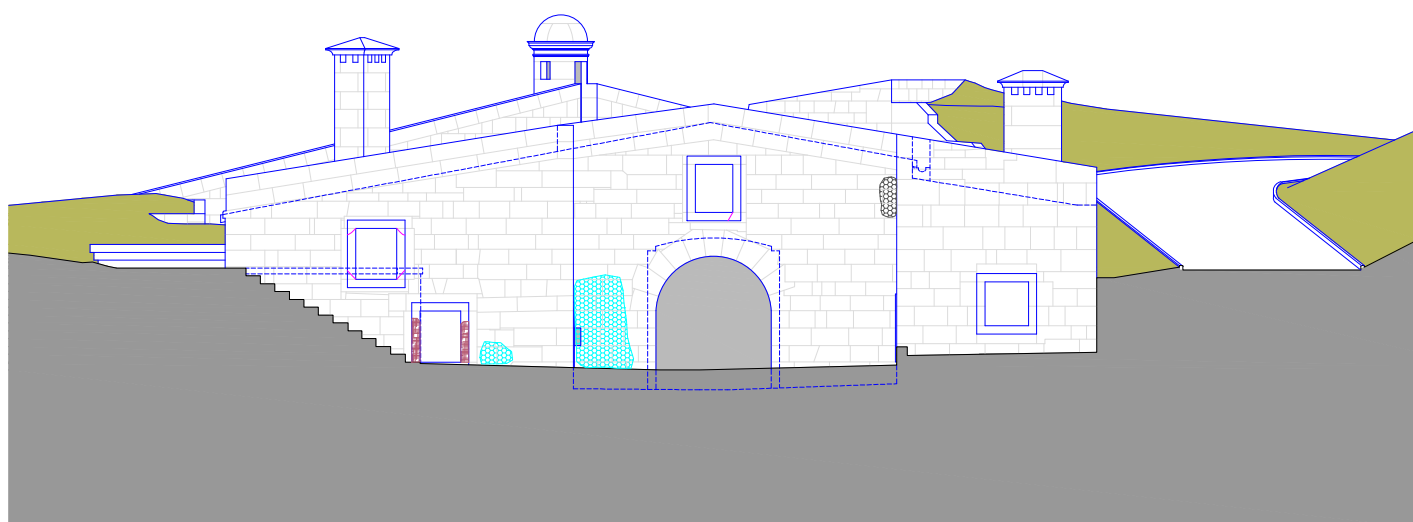
Anomalias não estruturais:	Anomalias estruturais:
Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.	Zona com deformações no plano.
Deterioração superficial do granito.	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
Rebaixe anormal no lageado.	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
Marcas de antigos combates.	Zona com assentamento de terreno.
Elementos de restauro degradados.	Zona com deformações para fora do plano.

Descrição: Mapeamento de anomalias na cobertura da porta magistral de S. Francisco.		 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Arqueologia e Património Cultural
Edifício: Porta Interior de São Francisco	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros	
Escala: 1/150	Verificou: Luís Ramos	
Data: 25 Junho 2016		Folha: 08



Legenda:	
Anomalias não estruturais:	
	Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.
	Deterioração superficial do granito.
	Ausência de escoamento de águas na ponte.
	Marcas de antigos combates.
Anomalias estruturais:	
	Zona com deformações no plano.
	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
	Zona com deformações para fora do plano.

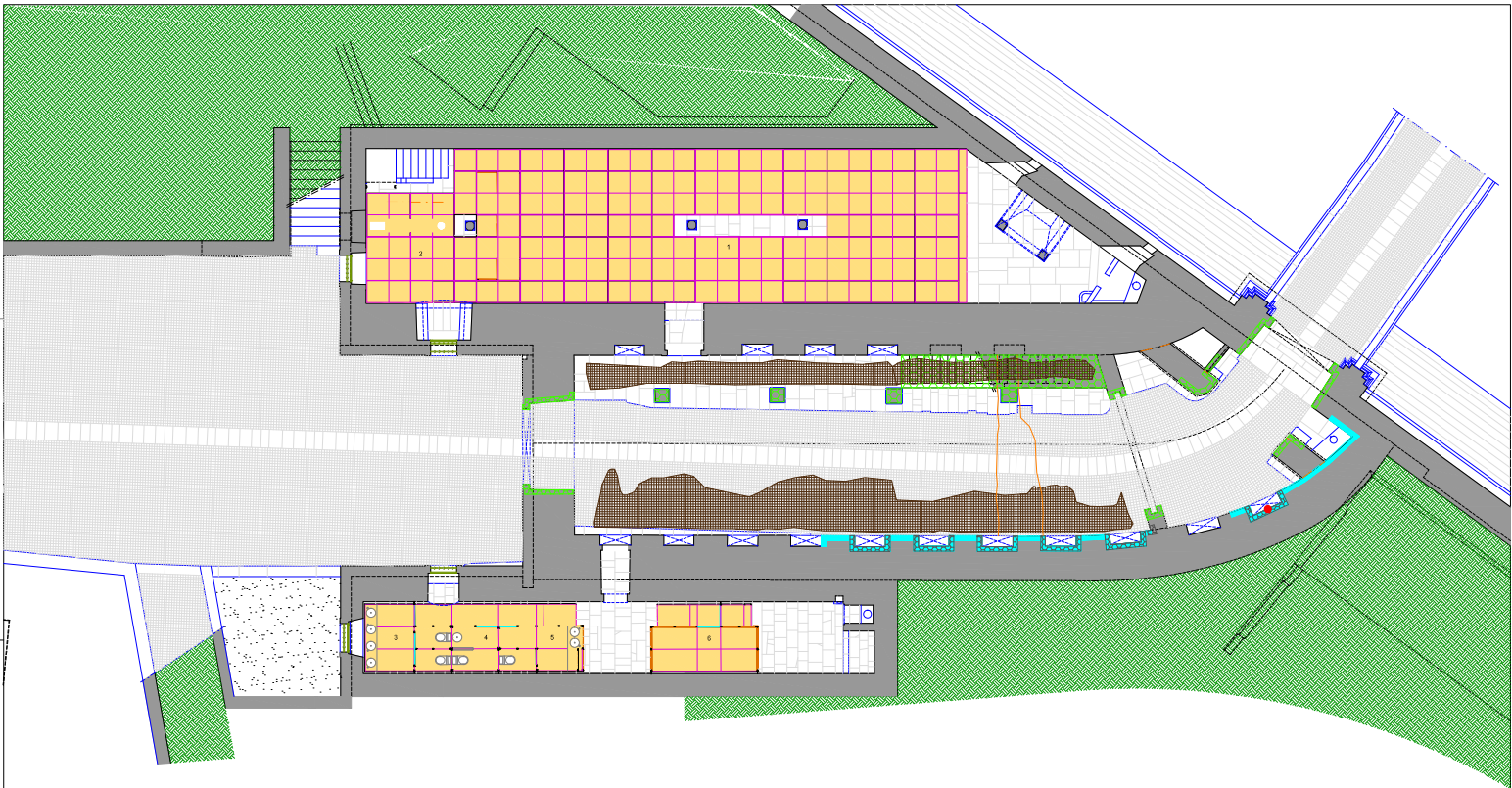
Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado principal da porta interior de Santo António.		 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Centro de Estudos e Investigação Científica
Edifício: Porta interior de Santo António	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros	Folha: <b>09</b>
Escala: 1/200	Verificou: Luís Ramos	
	Data: 25 Junho 2016	
	Rúbricas:	



ALÇADO POSTERIOR

Legenda:	
Anomalias não estruturais:	
	Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.
	Manchas de humidade.
	Fissuras nas pedras da janela devido à presença de grades de ferro.
	Pedras com elevado dano.
Anomalias estruturais:	
	Zona com deformações no plano.
	Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Afastamento anormal entre elementos estruturais (<2cm).
	Zona com deformações para fora do plano.

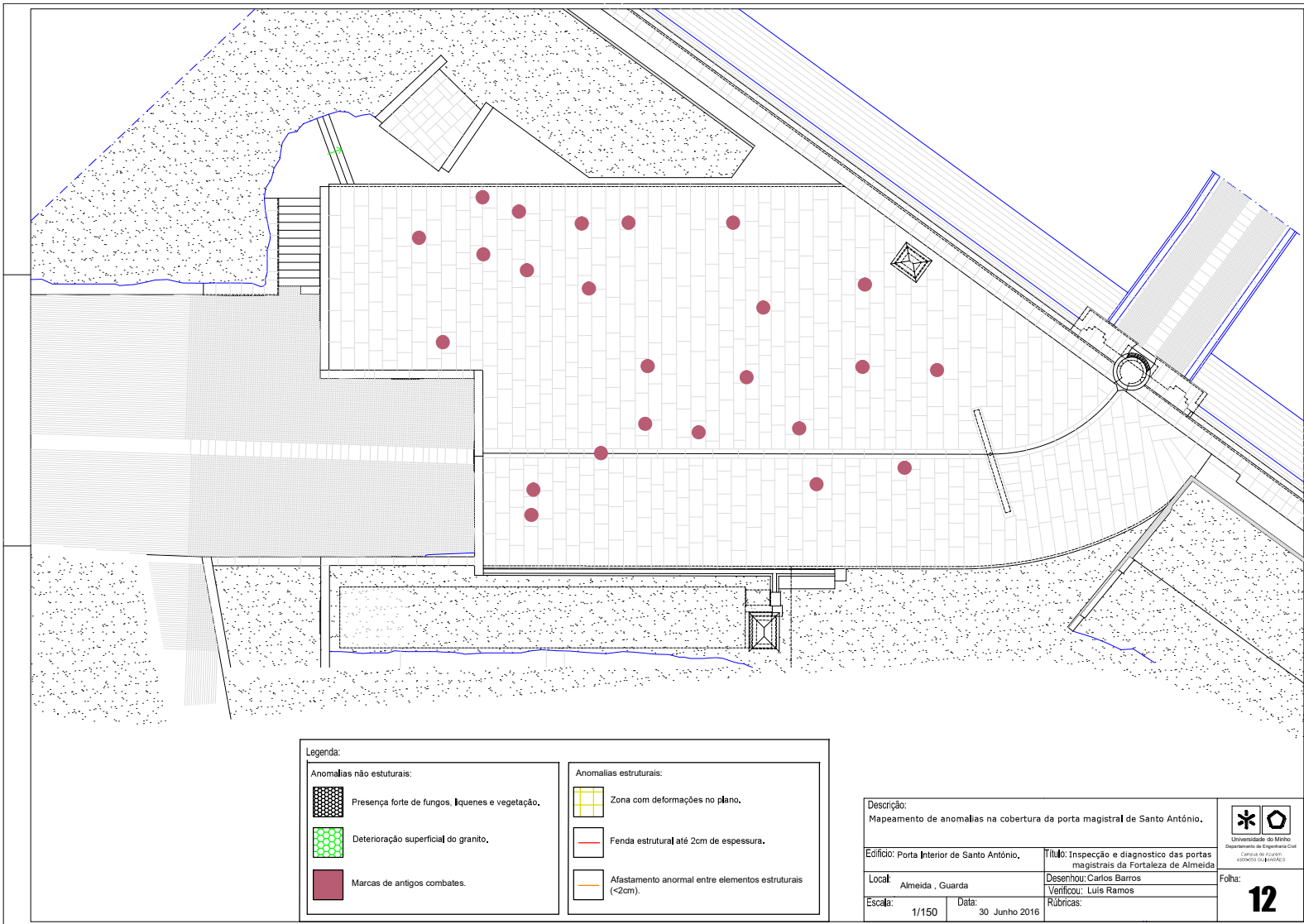
Descrição: Mapeamento de anomalias no alçado posterior da porta magistral de Santo António.		 Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Centro de Estudos e Investigação
Edifício: Porta Interior de Santo António,	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros	Folha: <b>10</b>
Escala: 1/100	Data: 25 Junho 2016	
	Verificou: Luís Ramos	
	Rubricas:	



Anomalias não estruturais:		Anomalias estruturais:	
	Presença forte de fungos, líquenes e vegetação.		Zona com deformações no plano.
	Deterioração superficial do granito.		Fenda estrutural até 2cm de espessura.
	Eflorescências na zona do tecto do túnel principal.		Afastamento anormal entre elementos estruturais no arco (<2cm).
	Manchas de humidade.		Zona com deformações para fora do plano.

Descrição: Mapeamento de anomalias no piso térreo da porta magistral de Santo António.	
Edifício: Porta Interior de Santo António.	Título: Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida
Local: Almeida, Guarda	Desenhou: Carlos Barros
Escala: 1/150	Verificou: Luís Ramos
	Rubricas:
	Data: 30 Junho 2016





#### **Anexo 4- Descrição dos locais de recolha de amostras.**

**Amostra 1** – Resina recolhida no alçado posterior da porta de exterior de São Francisco.



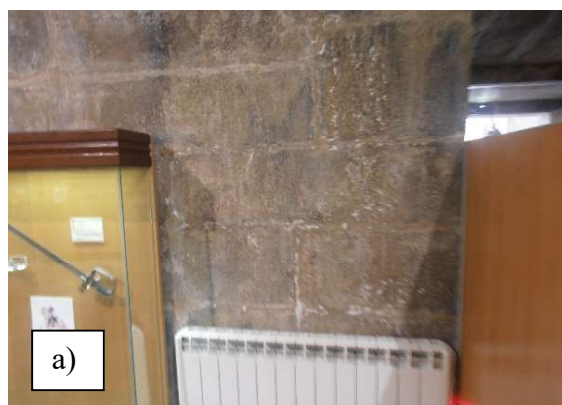
**Figura 1-** Local de recolha da amostra 1.

**Amostra 2-** Crostas da zona de humidade no túnel de transito da porta exterior de São Francisco, zona junta a entrada a cerca de 1.2m do pavimento.



**Figura 2-** Local de recolha da amostra 2: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

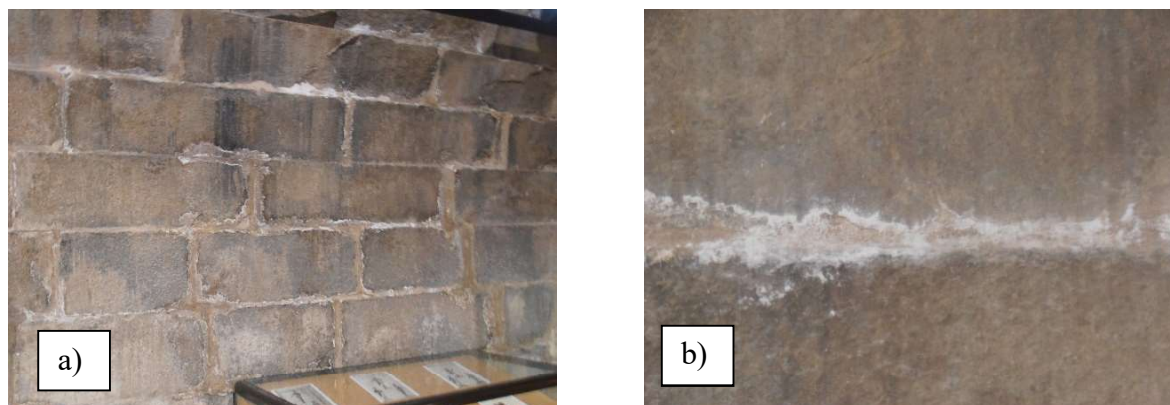
**Amostra 3-** Possíveis sais de cor branca na zona da entrada da Sala das Armas da porta exterior de São Francisco a cerca de 0.9m do pavimento.



**Figura 3-** Local de recolha da amostra 3: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

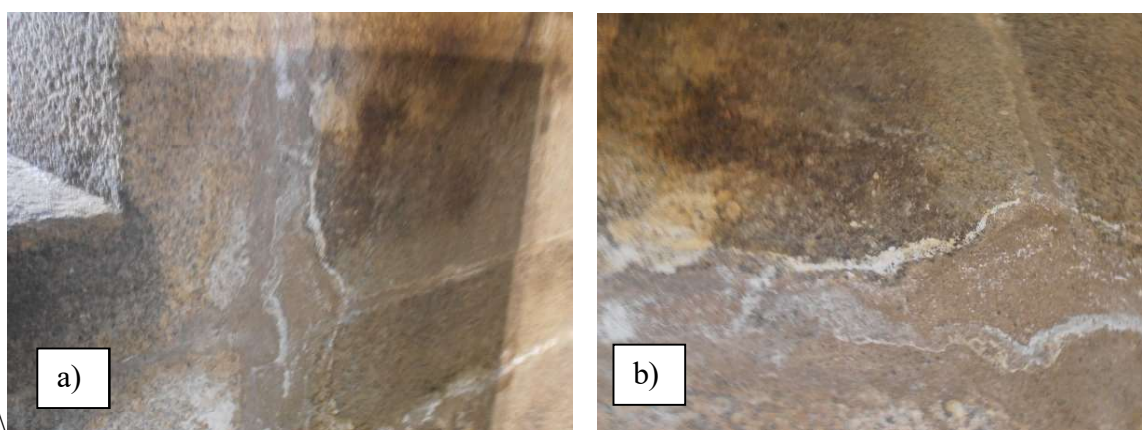


**Amostra 4** – Possíveis sais de cor branca na parede adjacente ao exterior da Sala das Armas da porta exterior de São Francisco a cerca de 1.6m do pavimento.



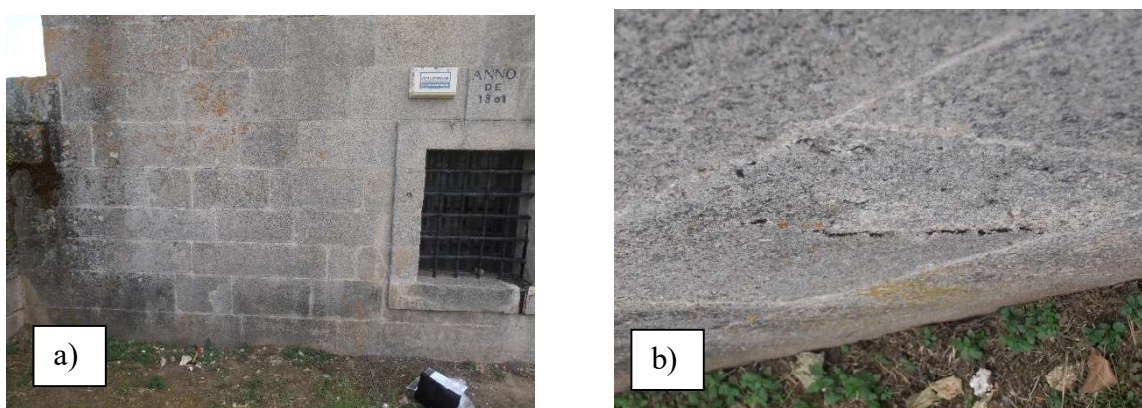
**Figura 4-** Local de recolha da amostra 4: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 5**– Possíveis sais de cor branca do anexo da Sala das Armas da porta exterior de São Francisco a cerca de 1.2m do pavimento.



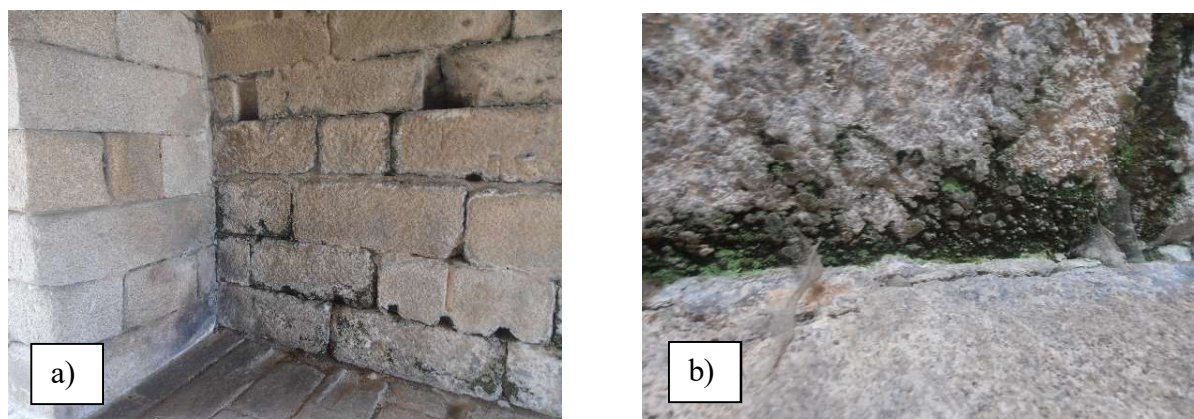
**Figura 5-** Local de recolha da amostra 5: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 6-** Material de deterioração superficial do granito no alçado posterior da porta exterior de São Francisco, a cerca de 70cm do terreno.



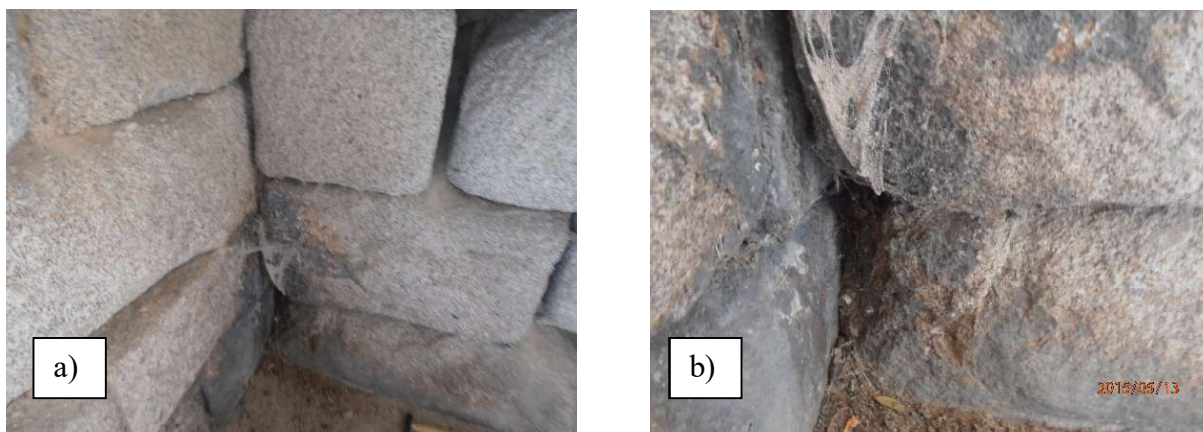
**Figura 6-** Local de recolha da amostra 6: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 7-** Material proveniente de fungos da zona transito da porta exterior de São Francisco.



**Figura 7-** Local de recolha da amostra 7: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 8-** Material proveniente de manchas negras na pedra junto ao pavimento da zona da entrada do túnel de transito da porta Magistral de São Francisco.



**Figura 8-** Local de recolha da amostra 8: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 9-** Argamassa de junta de alvenaria da parede do lado esquerdo do interior do túnel da porta magistral de São Francisco, a cerca de 1.5m de altura em relação ao pavimento.



**Figura 91-** Local de recolha da amostra 9.



**Amostra 10** - Possíveis sais de cor branca no teto do túnel junto ao pilastra esquerdo da entrada da porta de São Francisco.



**Figura 10**- Local de recolha da amostra 10.

**Amostra 11**- Material de deterioração superficial do granito no alçado principal da porta magistral de São Francisco, a cerca de 1.8m do muro do fosso.



**Figura 11**- Local de recolha da amostra 11: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

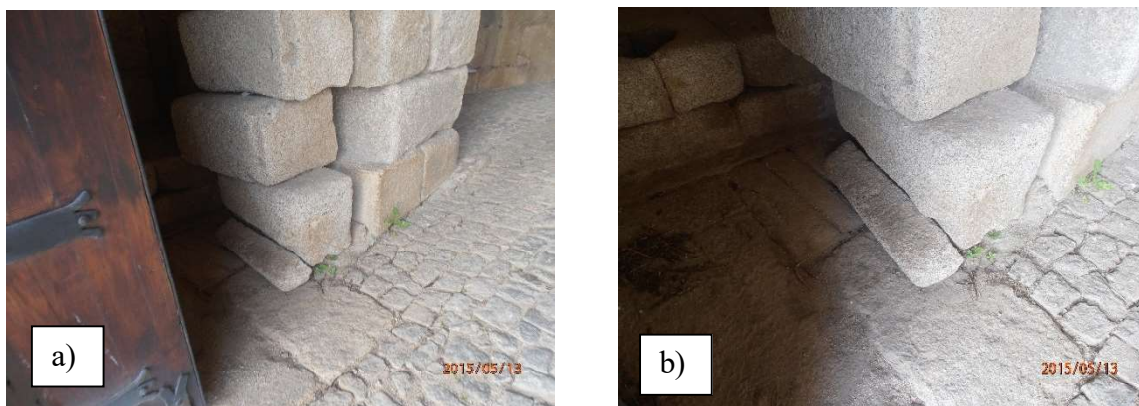
**Amostra 12**- Amostra de pedra da fachada na zona da entrada do túnel da porta magistral de São Francisco, junto ao solo.



**Figura 12**- Local de recolha da amostra 12: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

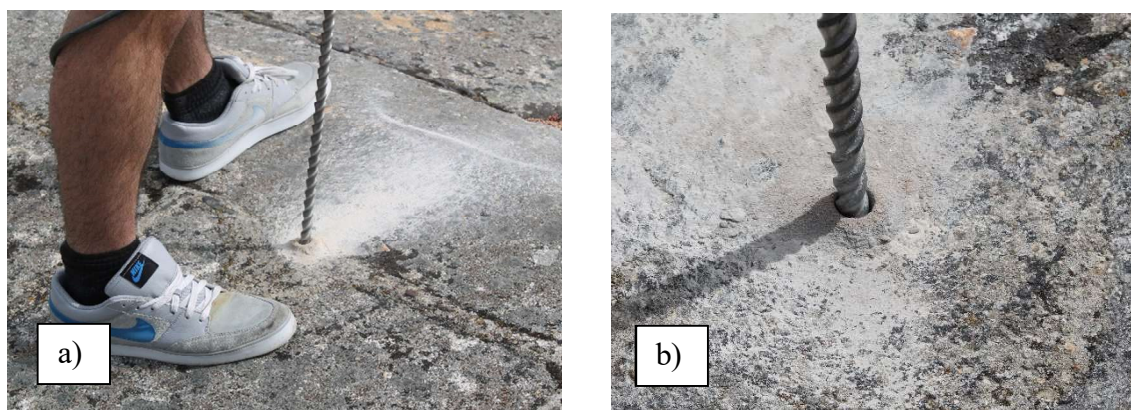


**Amostra 13-** Pedaco de pedra do lado esquerdo da zona da entrada do túnel da porta magistral de São Francisco, junto ao solo.



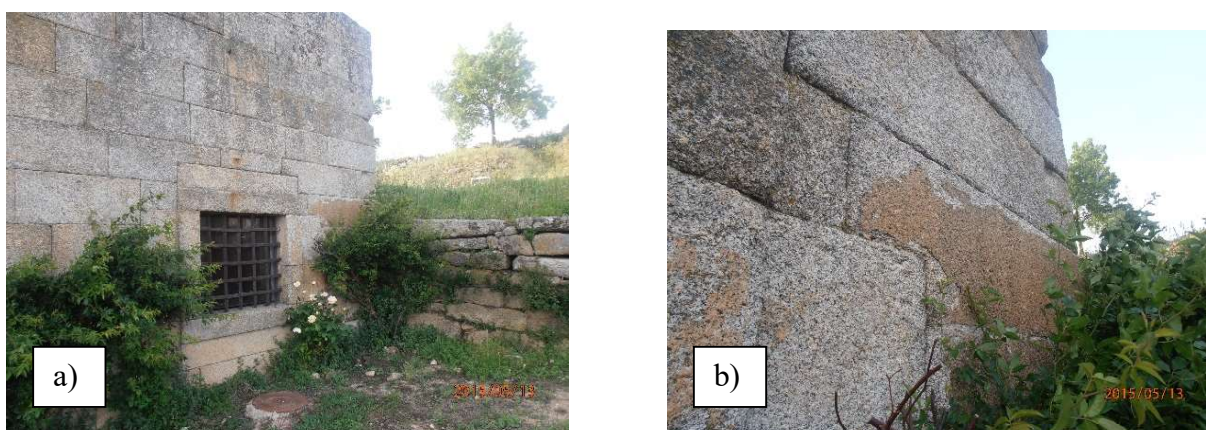
**Figura 13-** Local de recolha da amostra 13: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

**Amostra 14** – Material do furo realizado na cobertura da porta interior de São Francisco (possível argamassa cimentícia).



**Figura 14-** Local de recolha da amostra 14: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha.

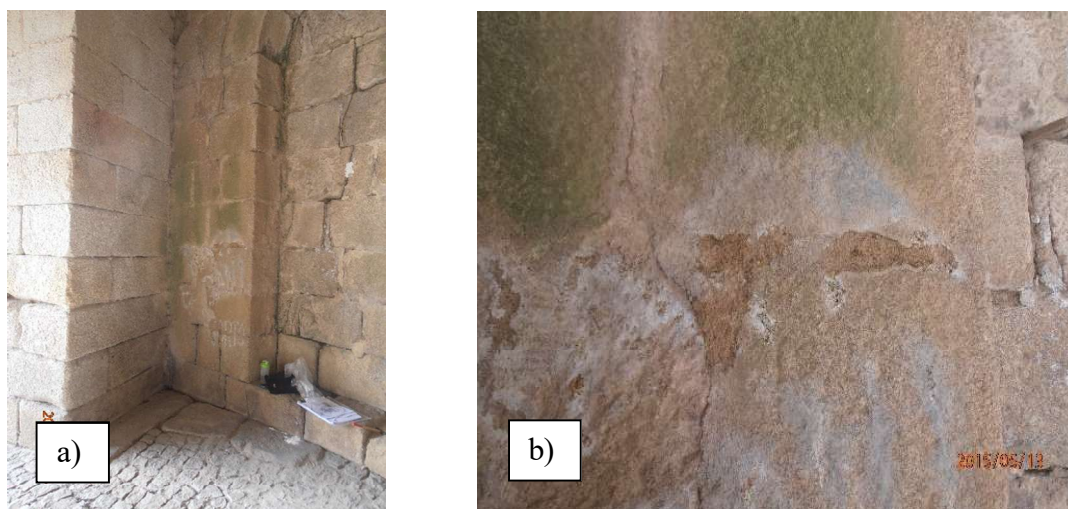
**Amostra 15-** Material de deterioração superficial do granito no alçado posterior da porta magistral de Santo António, a cerca de 1.2m do terreno.



**Figura 15-** Local de recolha da amostra 15: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha

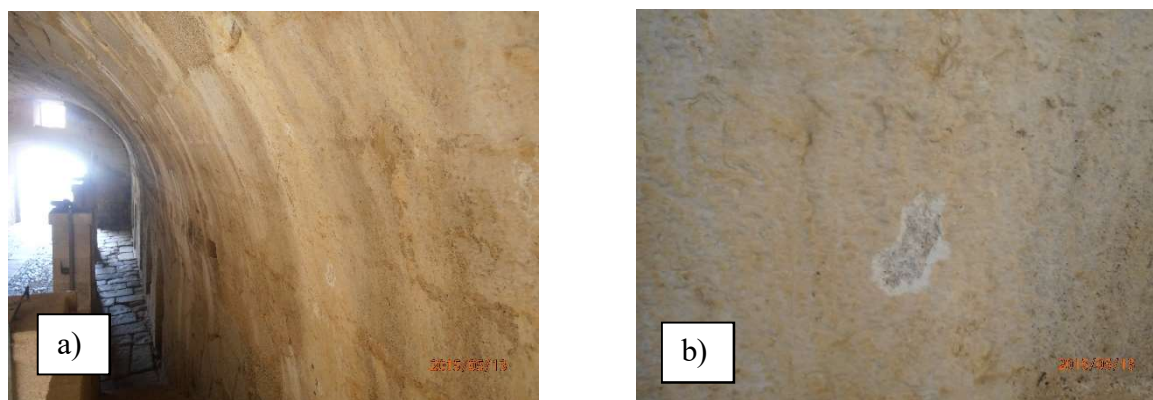


**Amostra 16-** Argamassa de junta de alvenaria do túnel de transito com presença de possíveis sais de cor branca na porta magistral de Santo António.



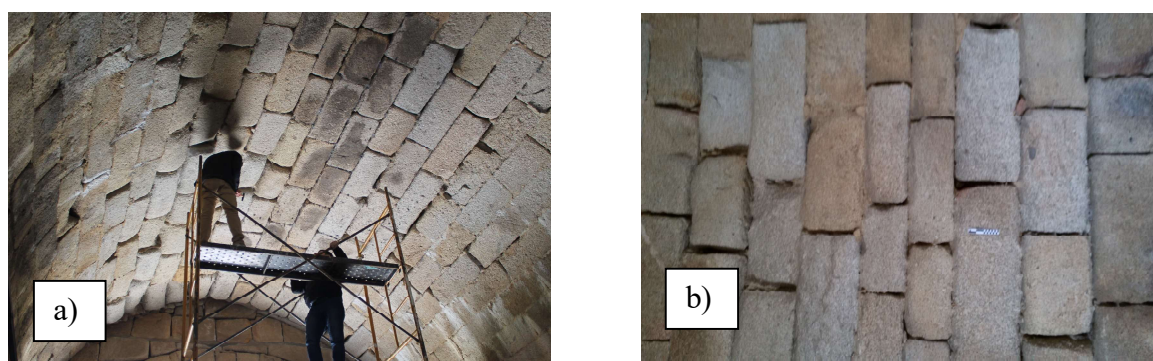
**Figura 16-** Local de recolha da amostra 16: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha

**Amostra 17** – Crostas de cor amarelada no teto do túnel e junto as escadas da porta magistral de Santo António.



**Figura 17-** Local de recolha da amostra 17: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha

**Amostra 18-** Pedaço de pedra do teto do túnel da porta magistral de São Francisco.



**Figura 18-** Local de recolha da amostra 18: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha

**Amostra 19** – Peça de pedra do túnel da porta magistral de Santo António.



**Figura 19-** Local de recolha da amostra 18: a) local de recolha; b) ampliação do local de recolha

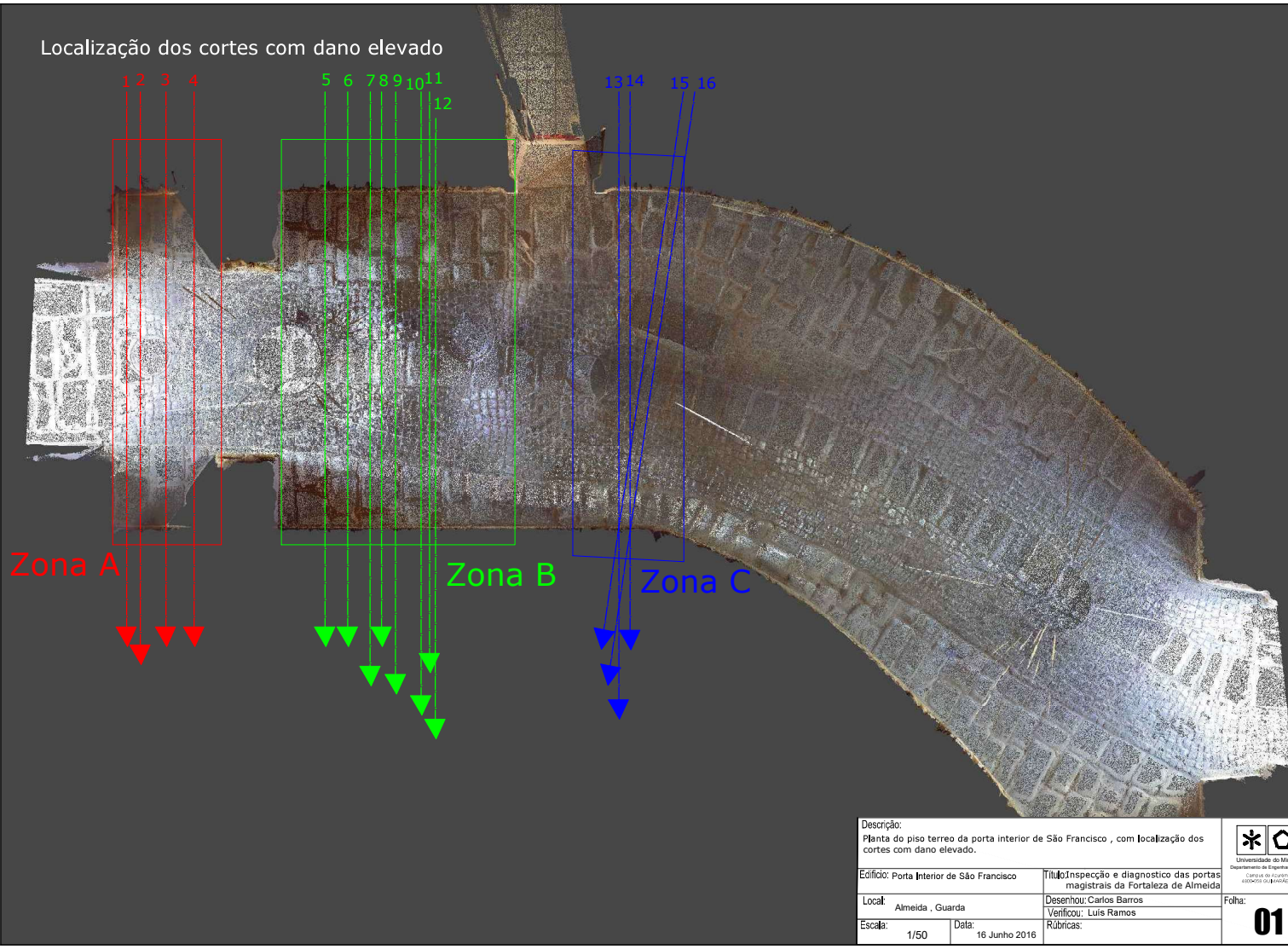
**Amostra 20-** Argamassa de junta do lajeado da cobertura da porta interior de Santo António.



**Figura 20-** Local de recolha da amostra 20.

**Anexo 5- Levantamento laser na porta magistral de São Francisco.**





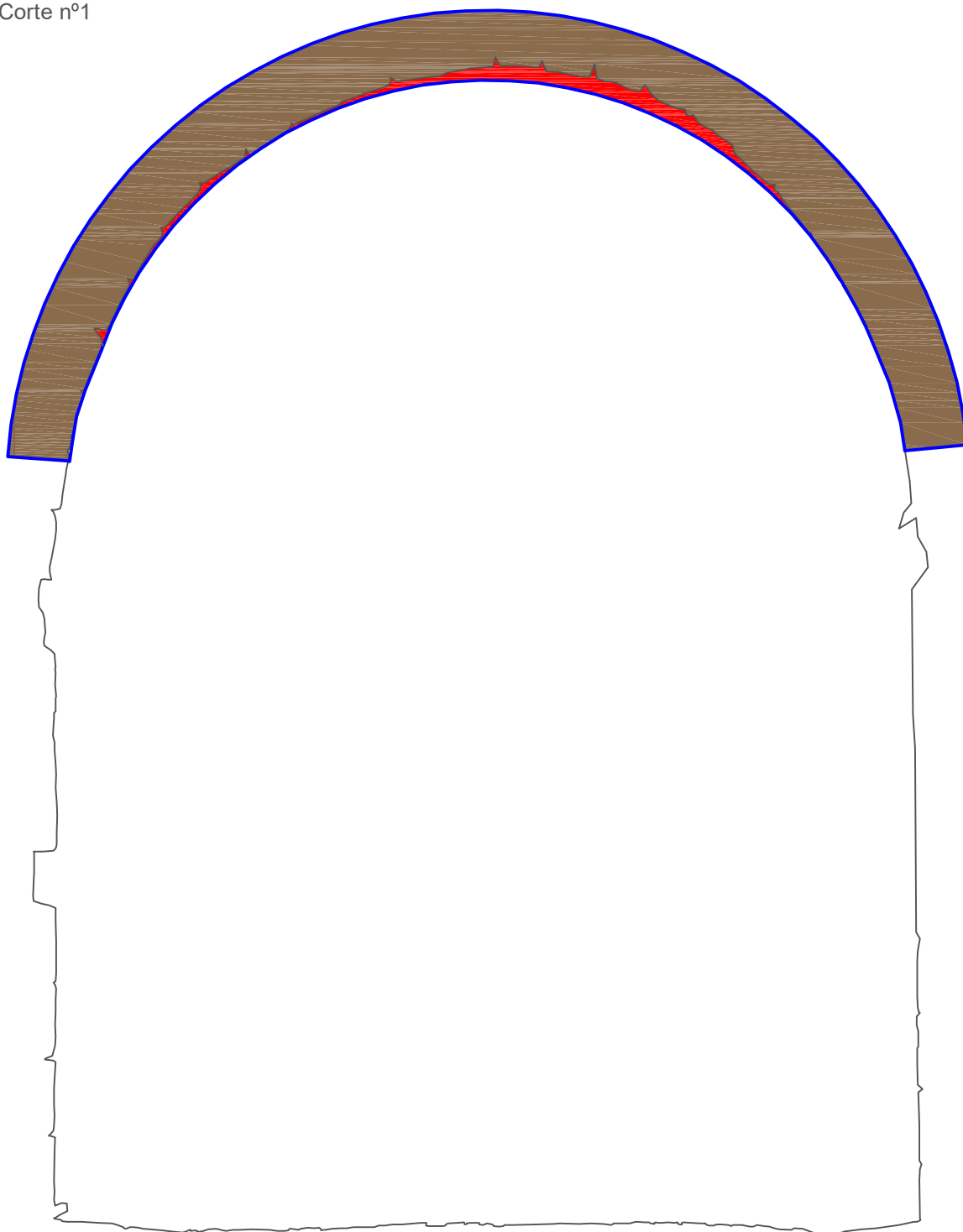
Descrição: Planta do piso terreo da porta interior de São Francisco , com localização dos cortes com dano elevado.		
Edifício: Porta Interior de São Francisco	Título: Inspeção e diagnostico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida	
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros	Folha:
Escala: 1/50	Data: 16 Junho 2016	Rúbricas:



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Apoio à Investigação

**01**

Corte nº1

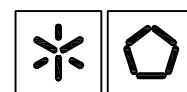


Legenda:

	Área de abóboda resistente existente.
	Área de abóboda resistente perdida.
	Limites de abóboda original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº1 da abóboda, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

16 Junho 2016

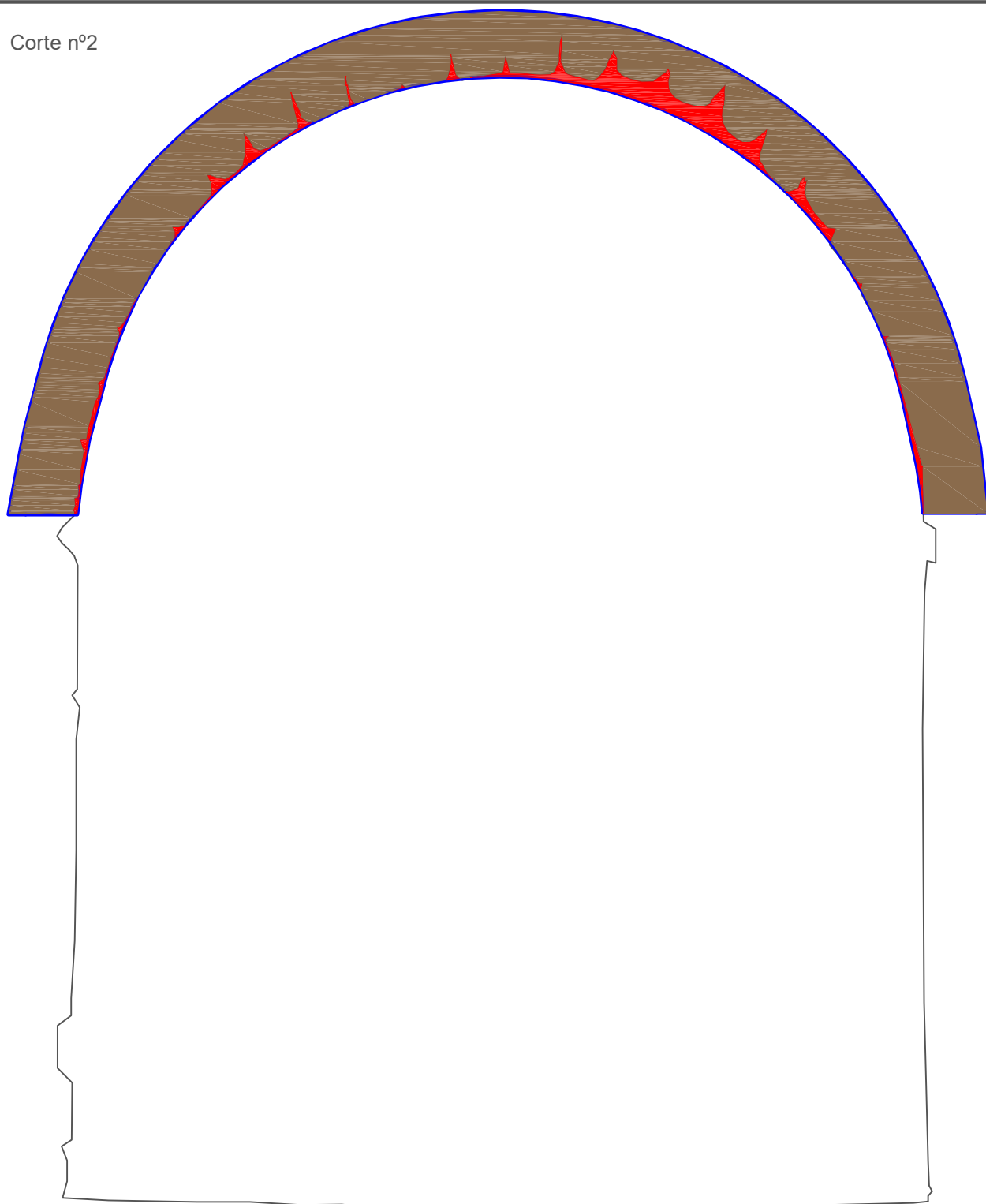
**Rúbricas:**

**Folha:**





**02**



Corte nº2

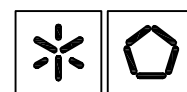


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº2 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida , Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

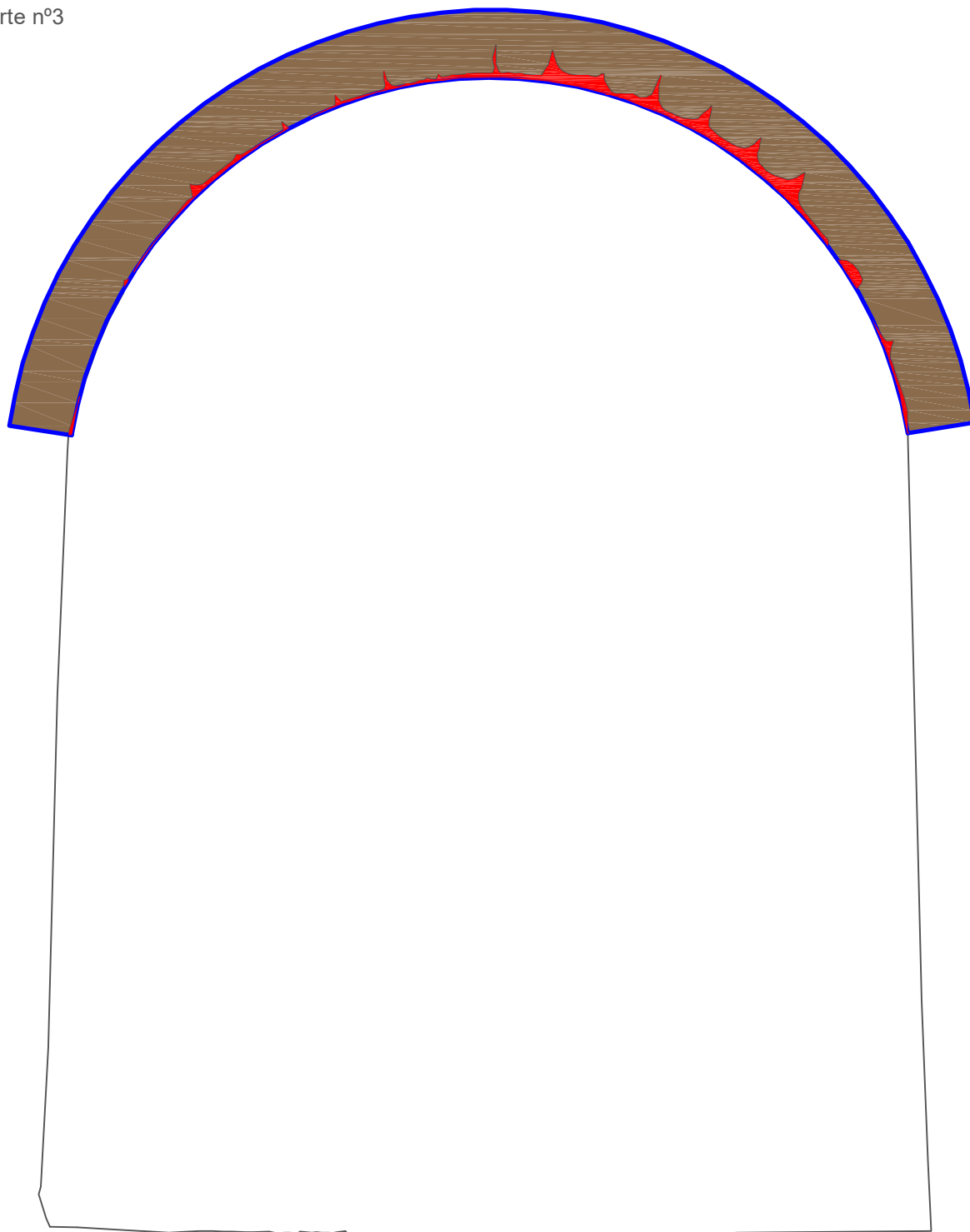
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**03**

Corte nº3

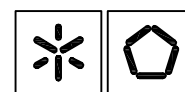


Legenda:

	Área de abóboda resistente existente.
	Área de abóboda resistente perdida.
	Limites de abóboda original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº3 da abóboda, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

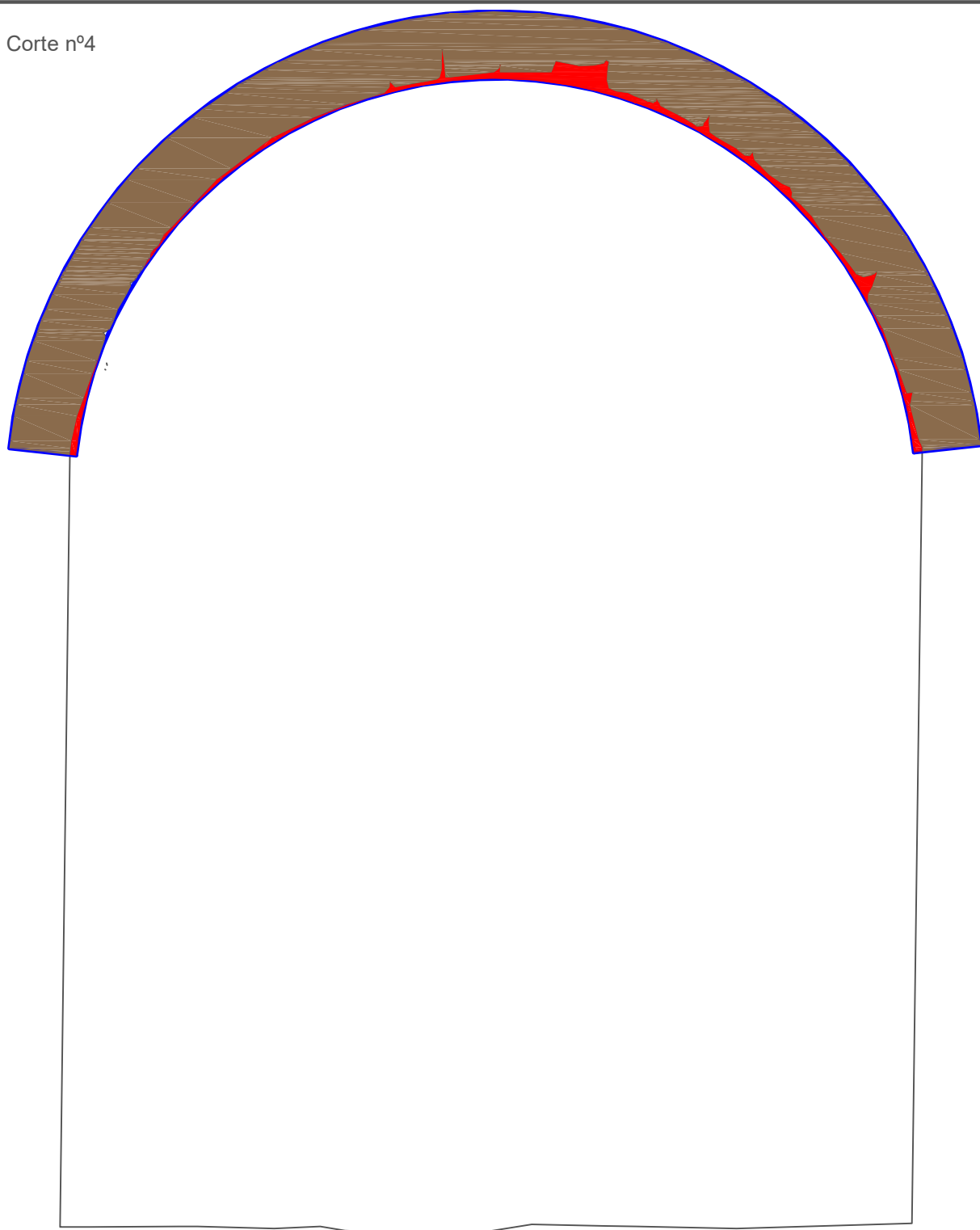
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**04**

Corte nº4

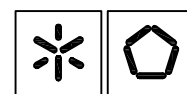


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº4 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

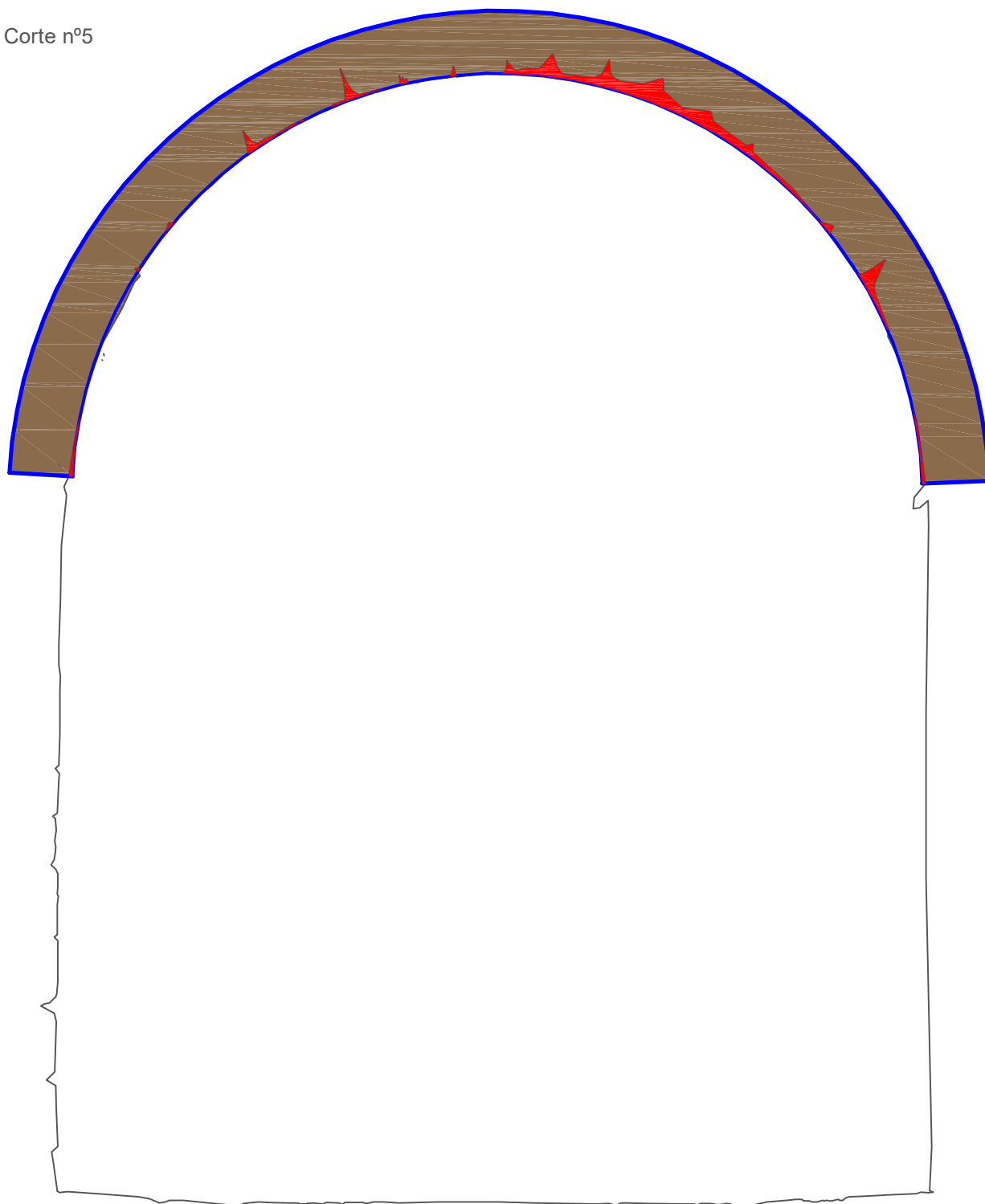
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**05**

Corte nº5

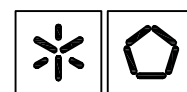


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº5 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

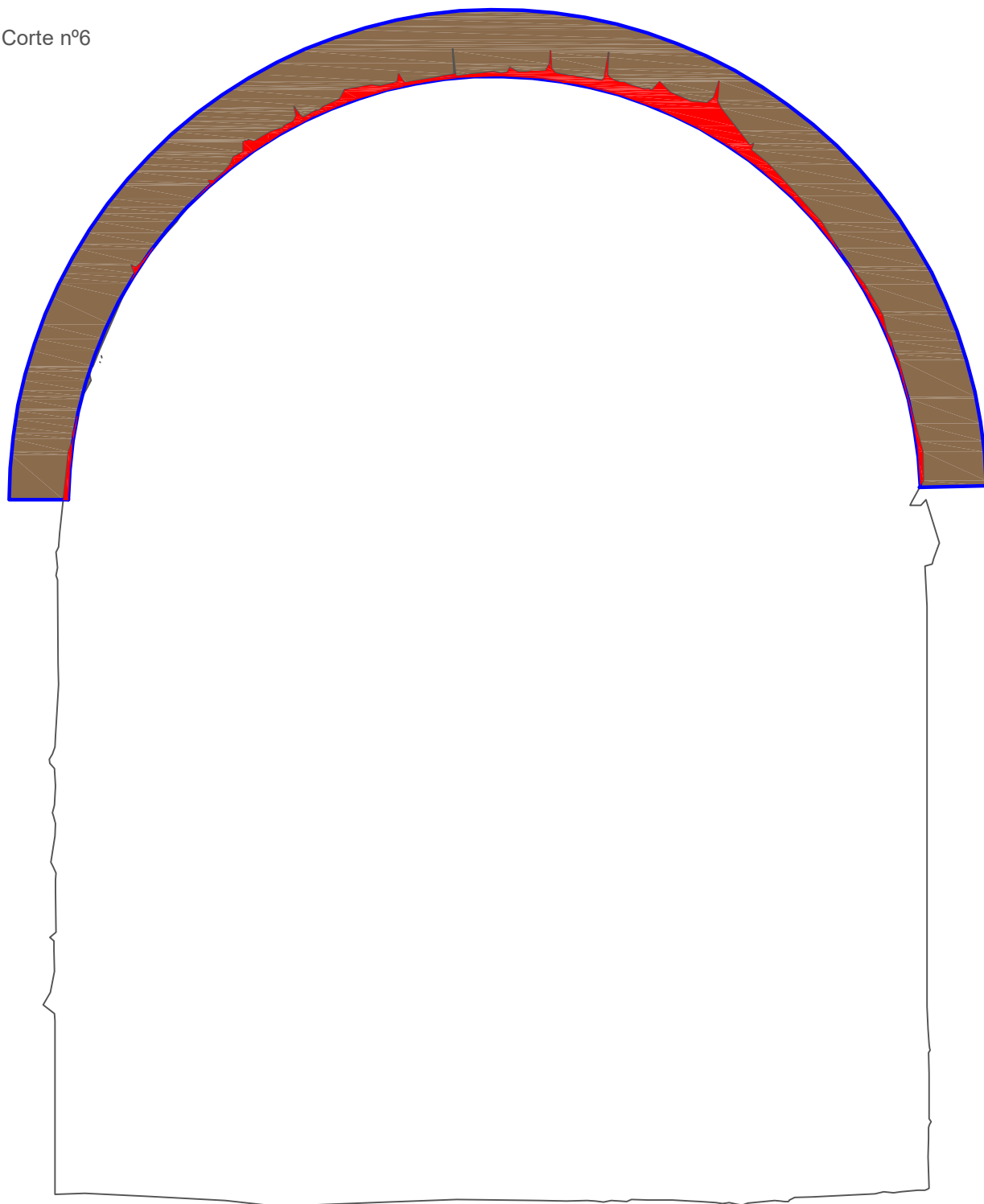
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**06**

Corte nº6

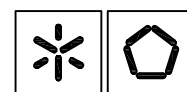


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº6 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

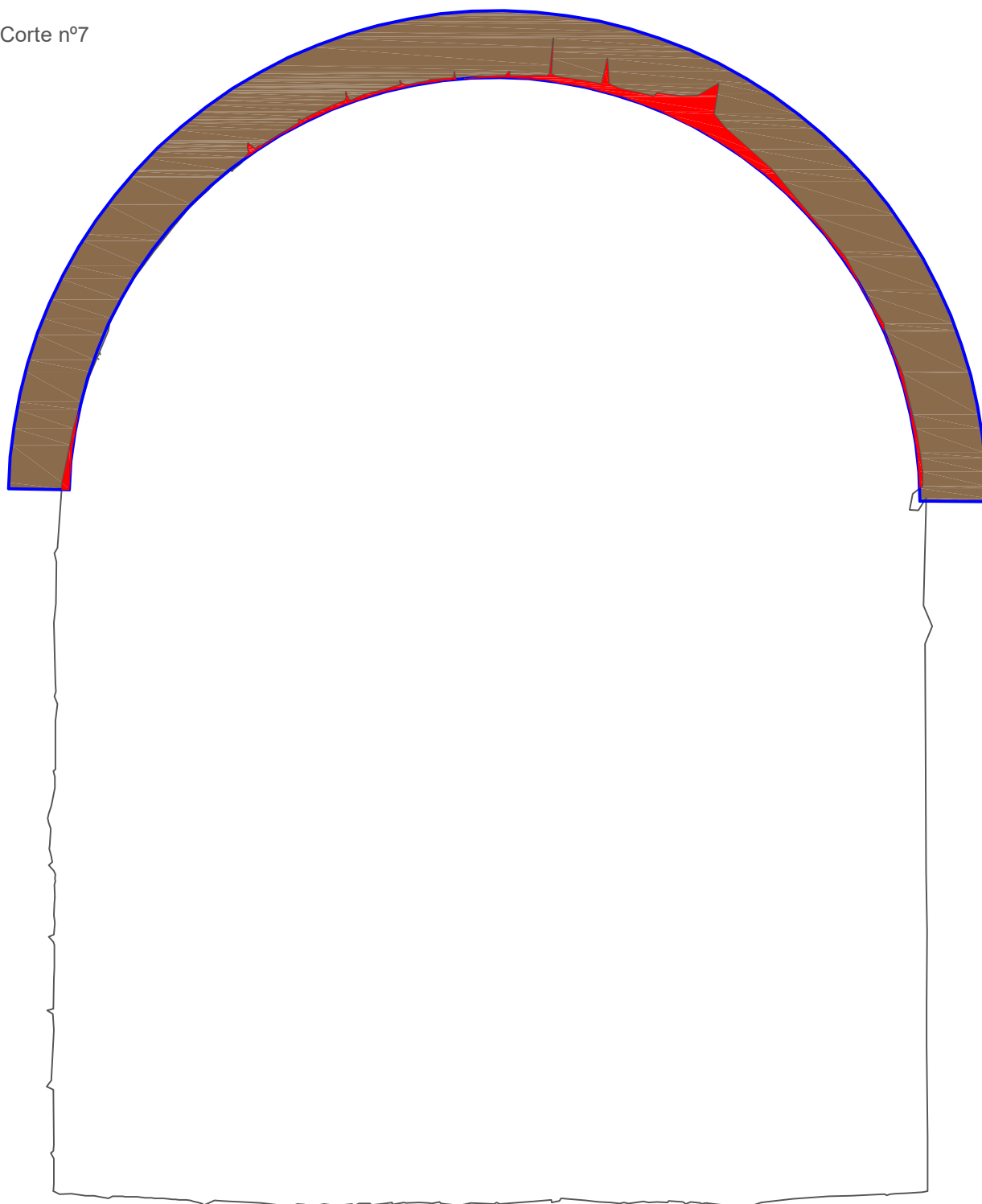
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**07**

Corte nº7

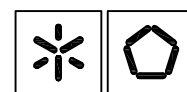


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº7 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

16 Junho 2016

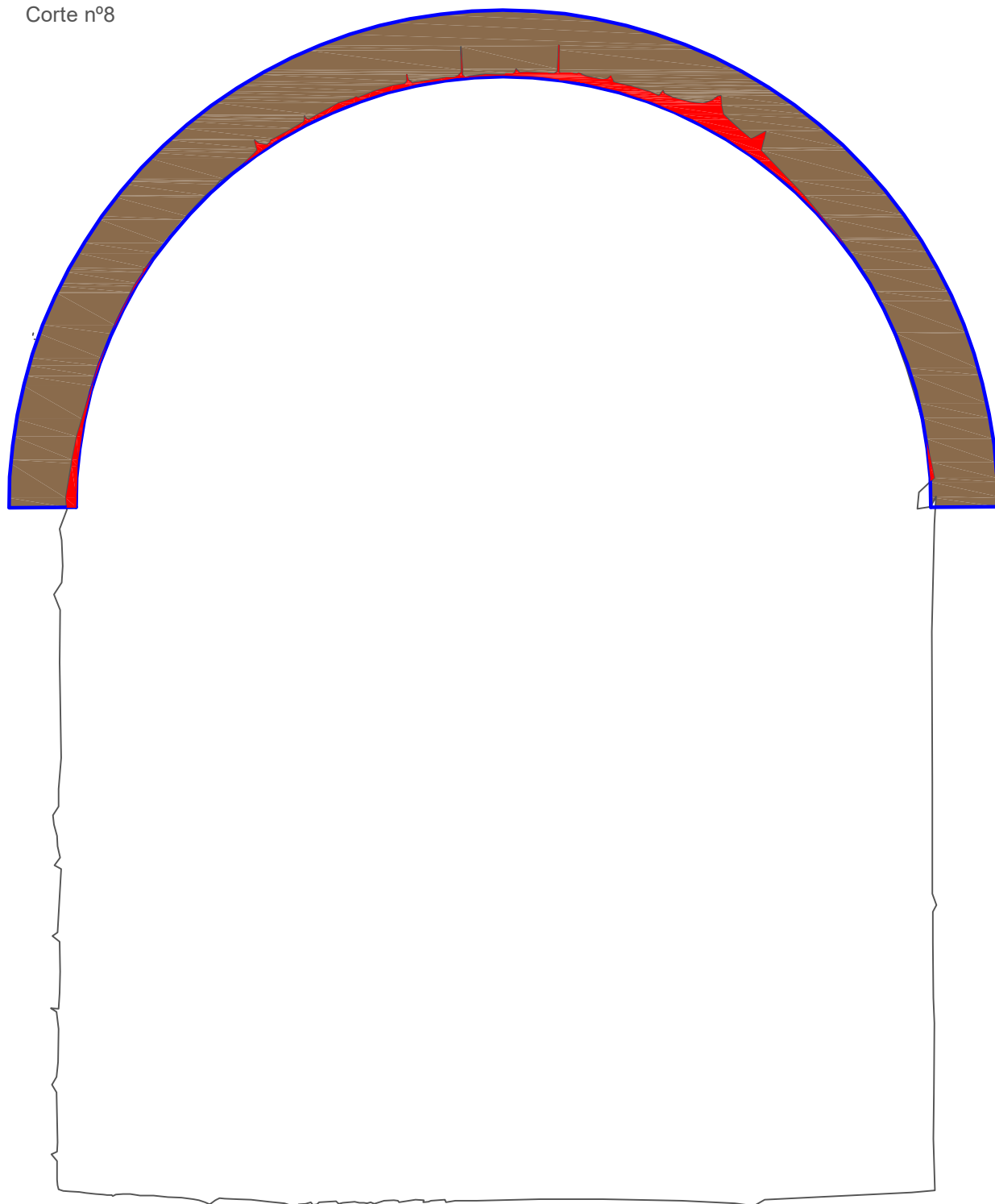
**Rúbricas:**

**Folha:**

**08**



Corte nº8

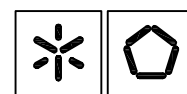


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº8 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

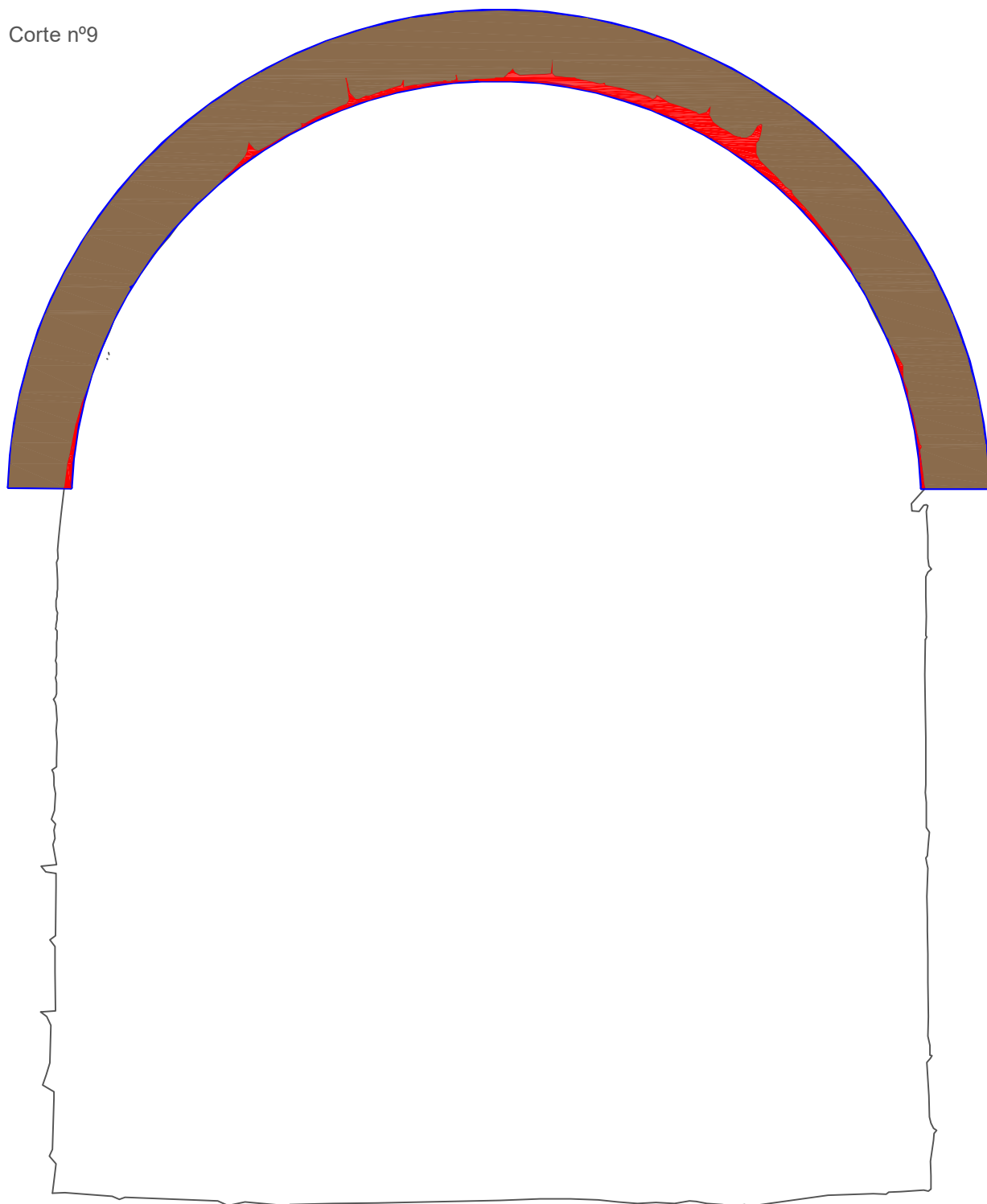
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**09**

Corte nº9

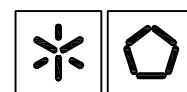


Legenda:

	Área de abóboda resistente existente.
	Área de abóboda resistente perdida.
	Limites de abóboda original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº9 da abóboda, pertencente ao tunél da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

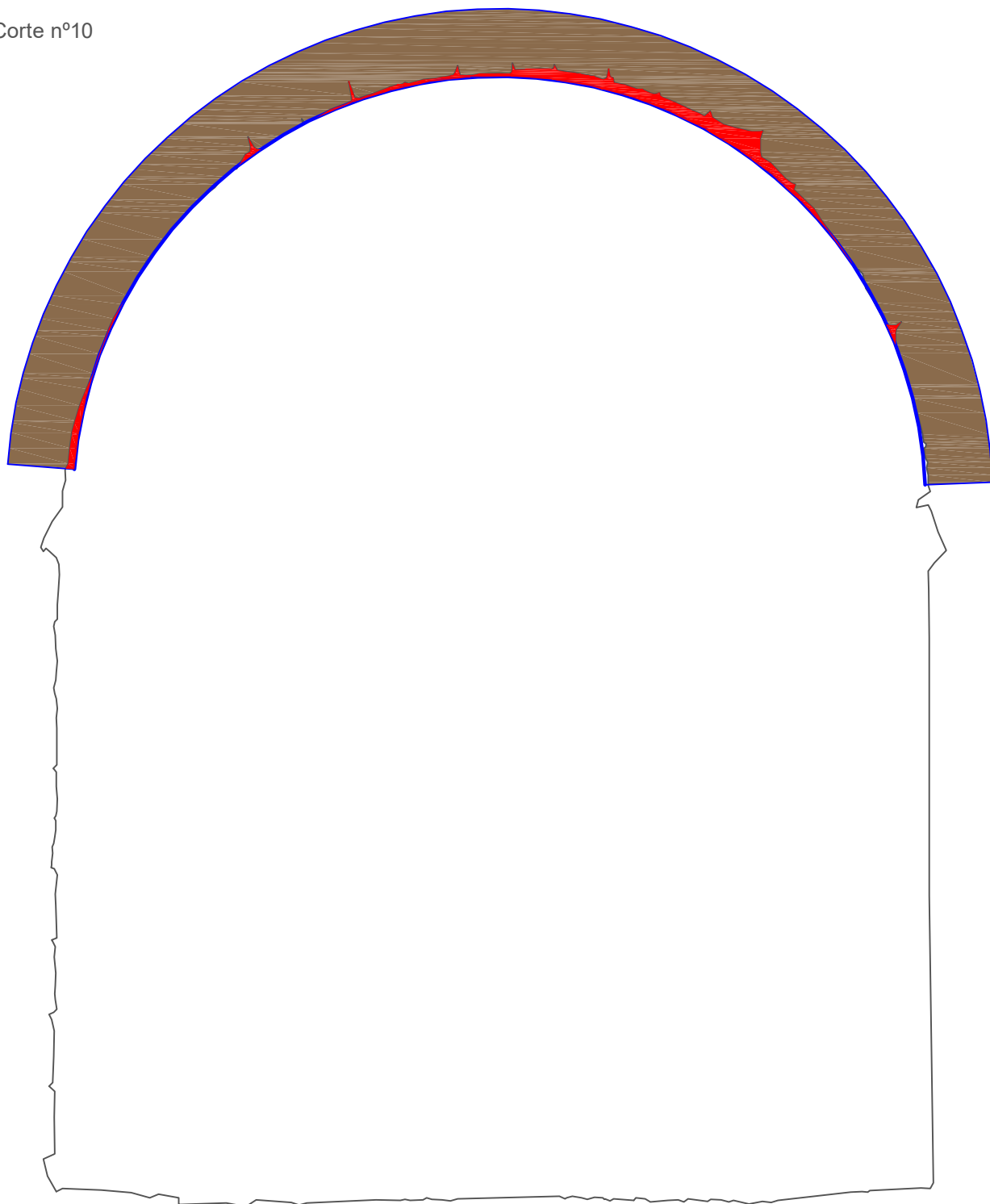
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**10**

Corte nº10

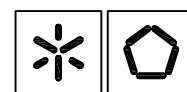


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº10 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

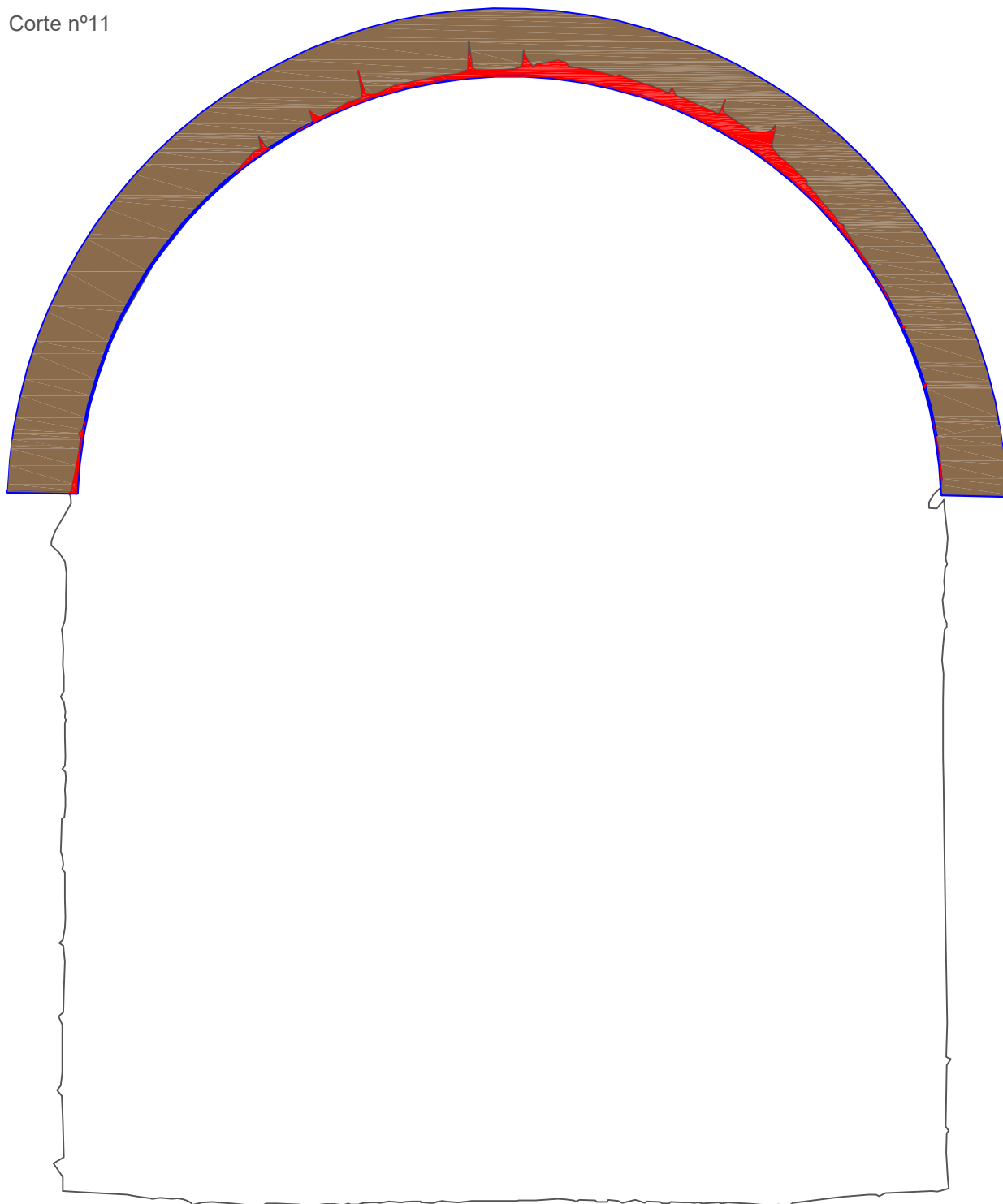
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**11**

Corte nº11

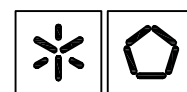


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº11 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

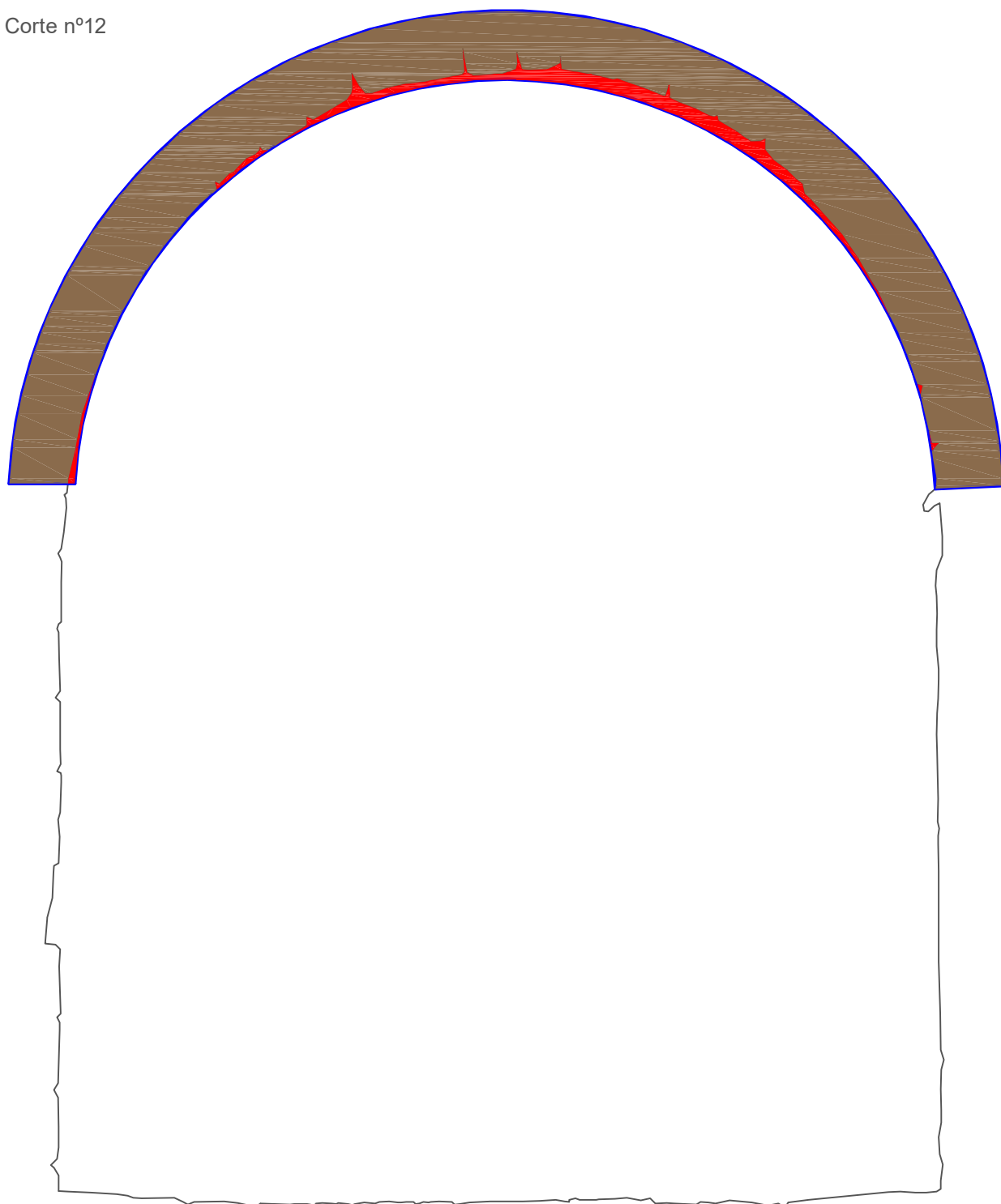
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**12**

Corte nº12

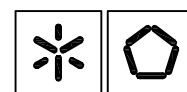


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº12 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

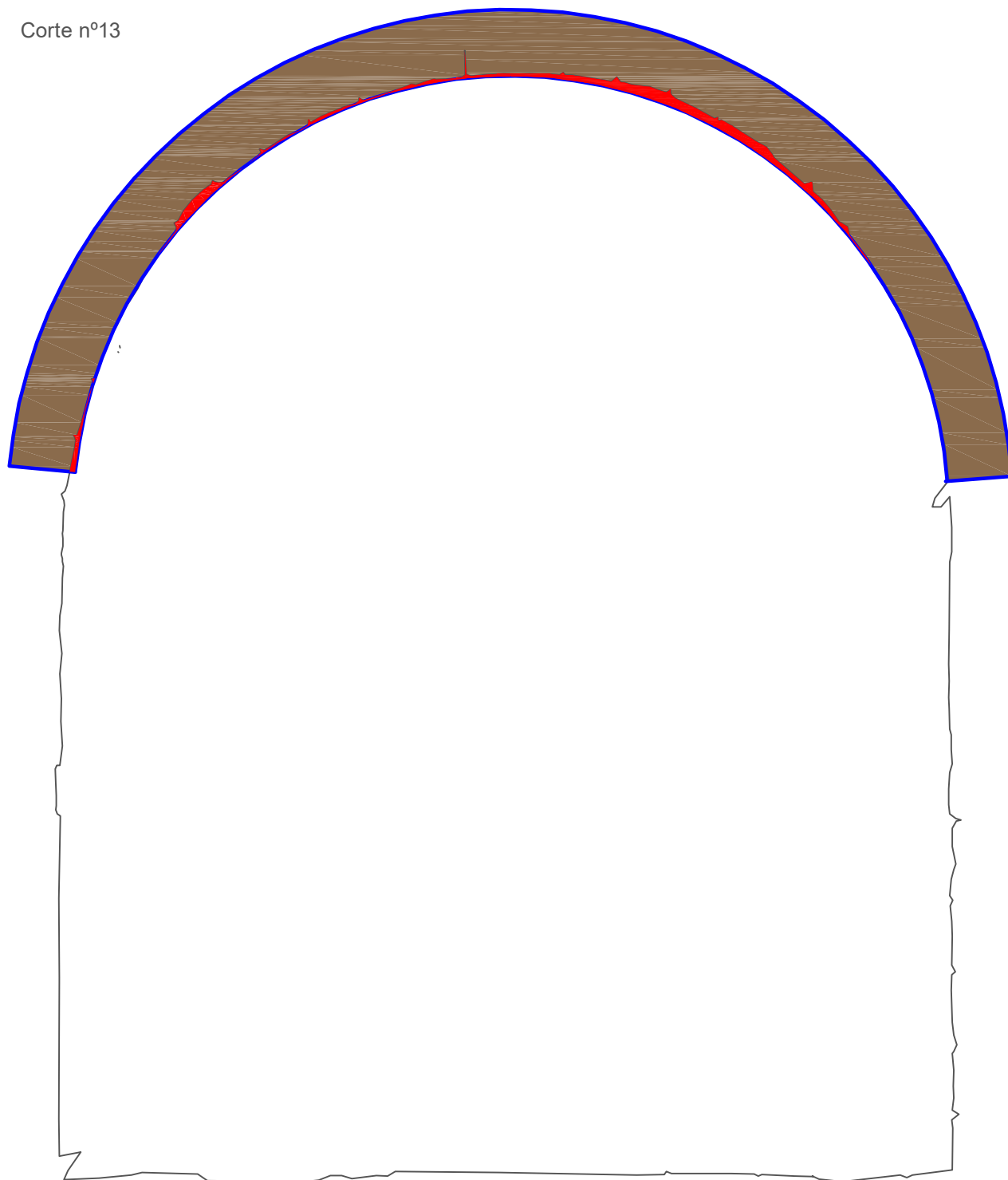
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**13**

Corte nº13

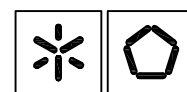


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº13 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

16 Junho 2016

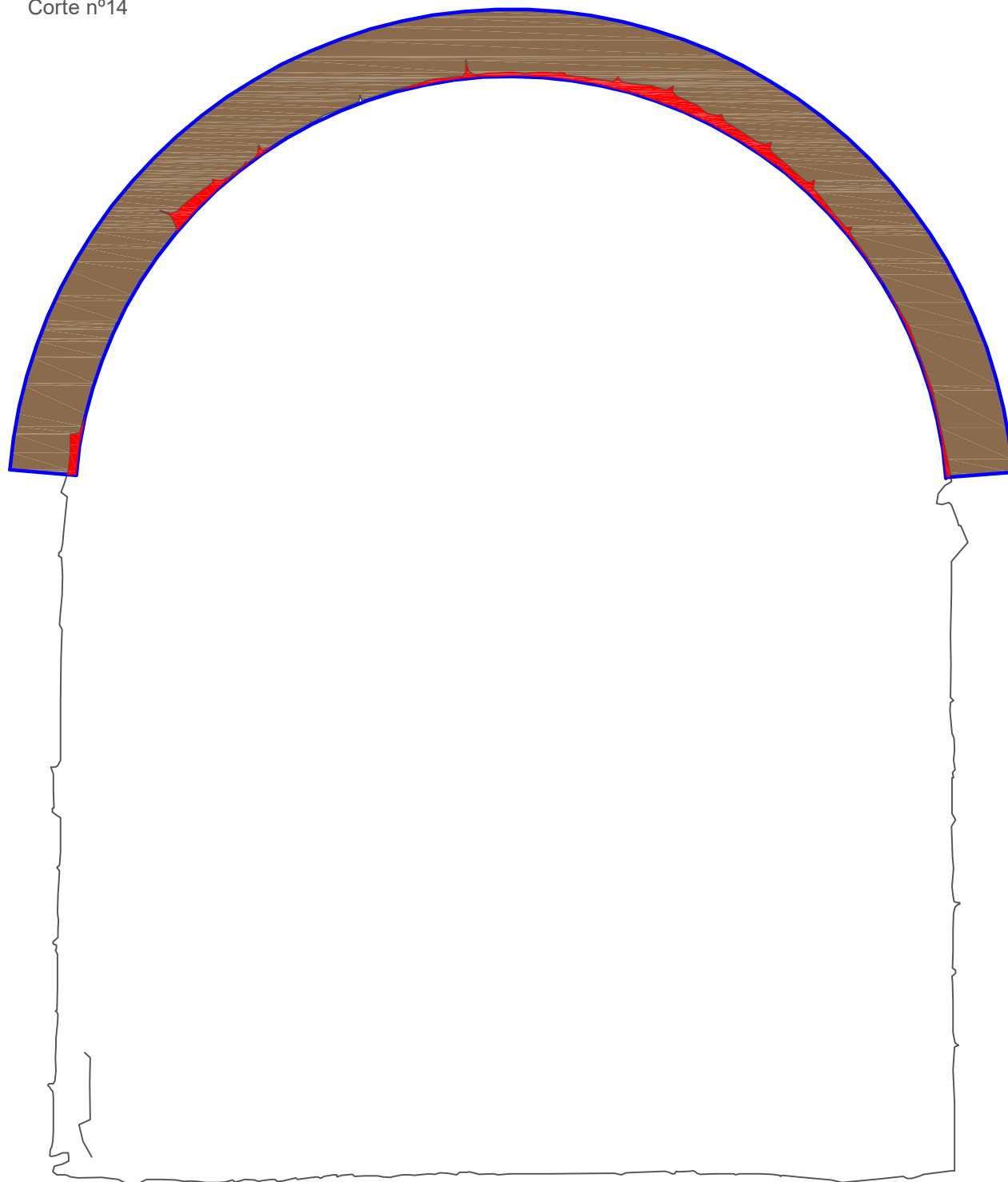
**Rúbricas:**

**Folha:**





**14**



Corte nº14

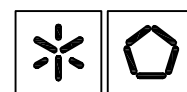


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº14 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

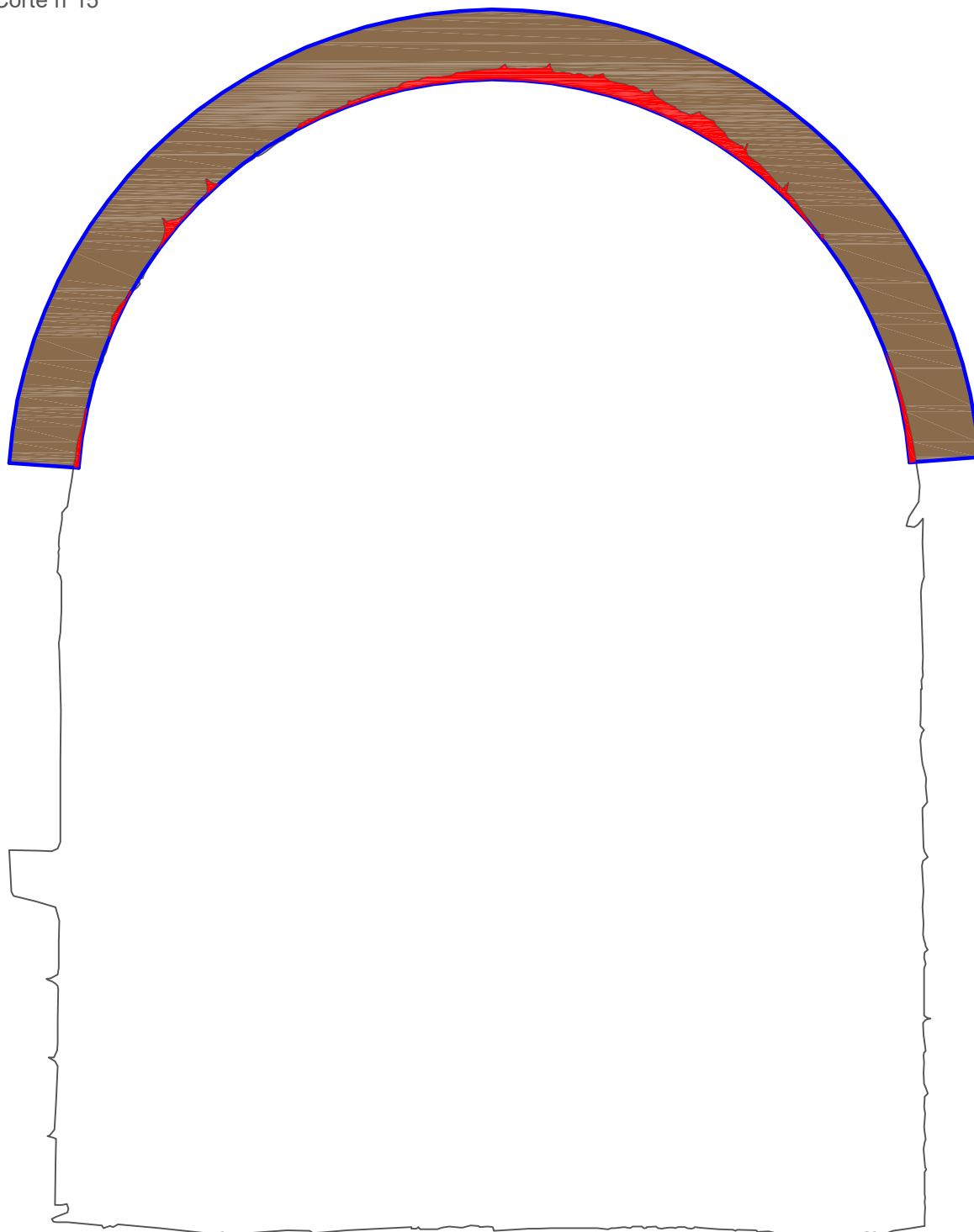
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**15**

Corte nº15

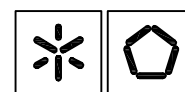


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº15 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

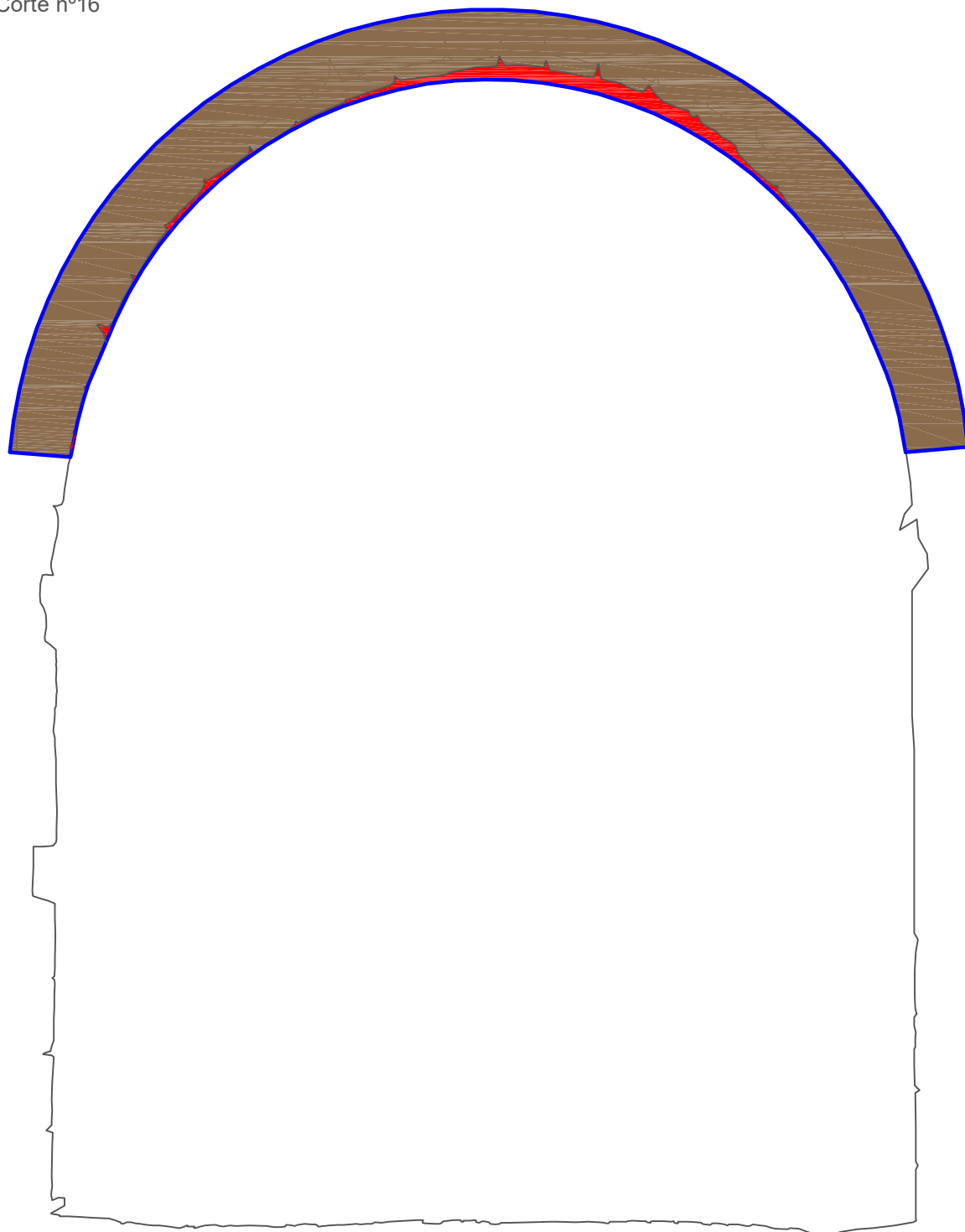
16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**16**

Corte nº16

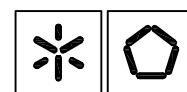


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº16 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de São Francisco.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de São Francisco

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/33

**Data:**

16 Junho 2016

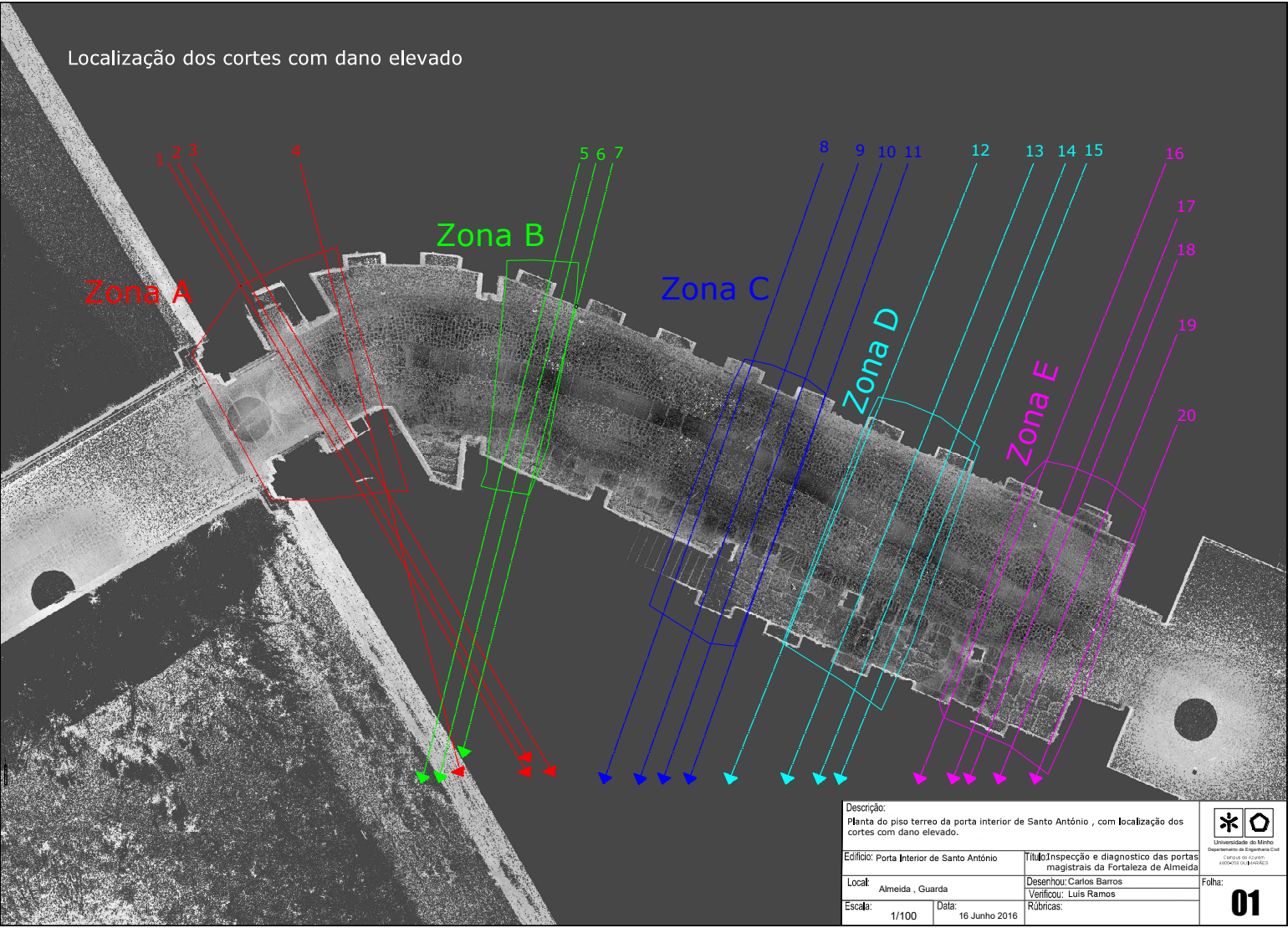
**Rúbricas:**

**Folha:**

**17**

**Anexo 6- Levantamento laser na porta magistral de Santo António.**

Localização dos cortes com dano elevado



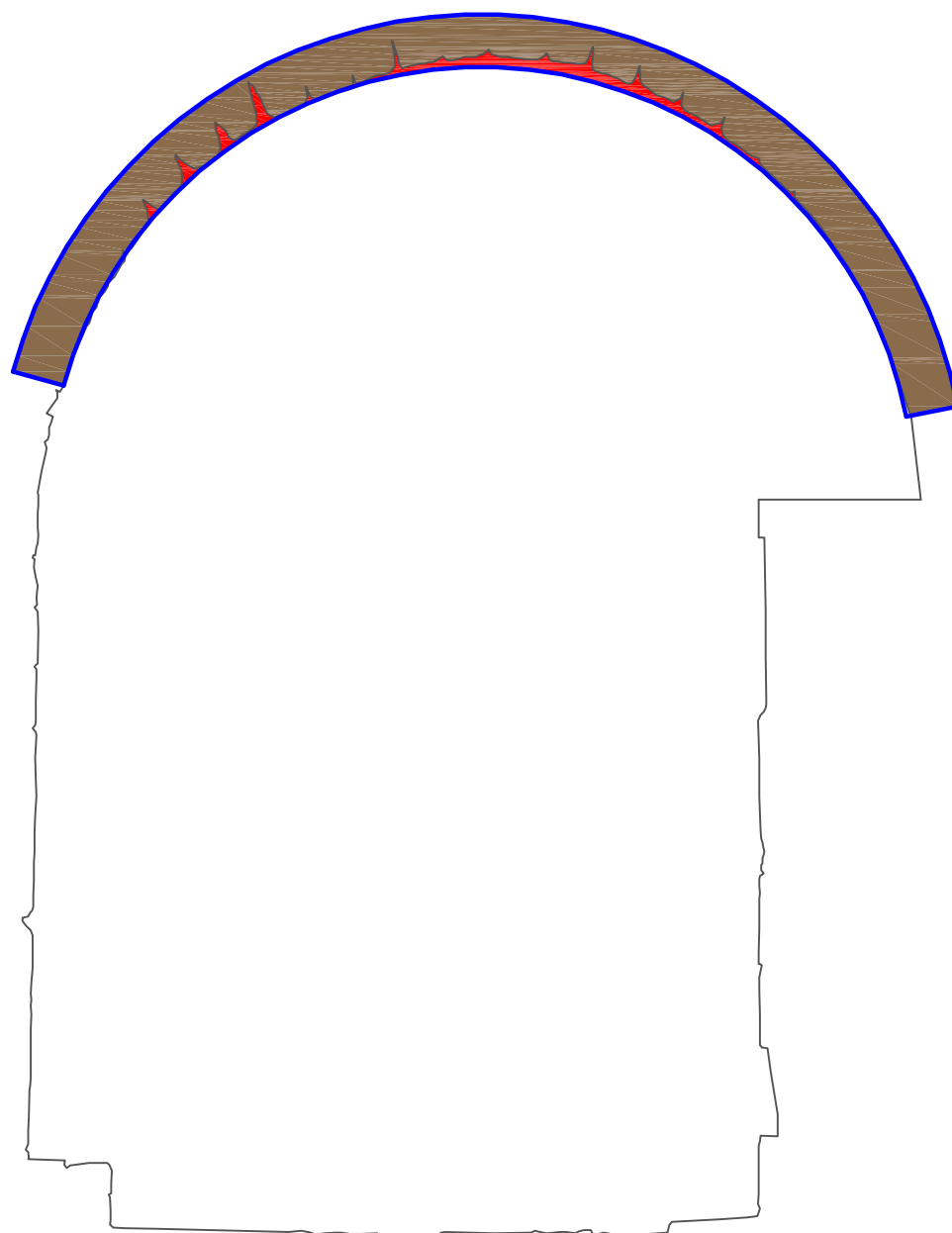
Descrição: Planta do piso terreo da porta interior de Santo António , com localização dos cortes com dano elevado.	
Edifício: Porta Interior de Santo António	Título: Inspeção e diagnostico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida
Local: Almeida , Guarda	Desenhou: Carlos Barros
Escala: 1/100	Verificou: Luis Ramos
Data: 16 Junho 2016	
Rúbricas:	







Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
CURSO DE LICENCIATURA  
EM ENGENHARIA CIVIL

Folha:  
**01**

Corte nº1

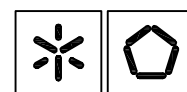


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº1 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

**Data:**

16 Junho 2016

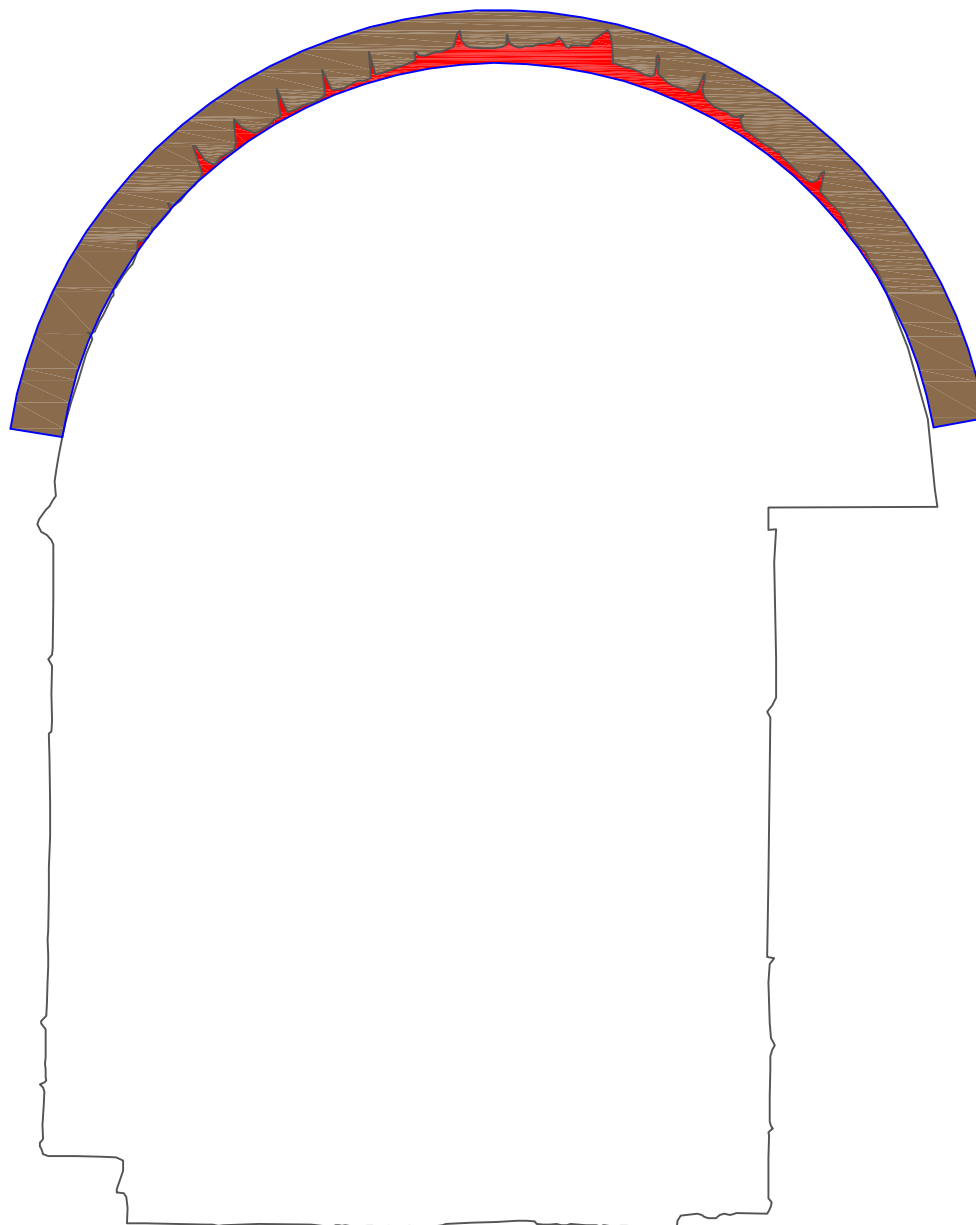
**Rúbricas:**

**Folha:**





**02**



Corte nº2



Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº2 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

**Data:**

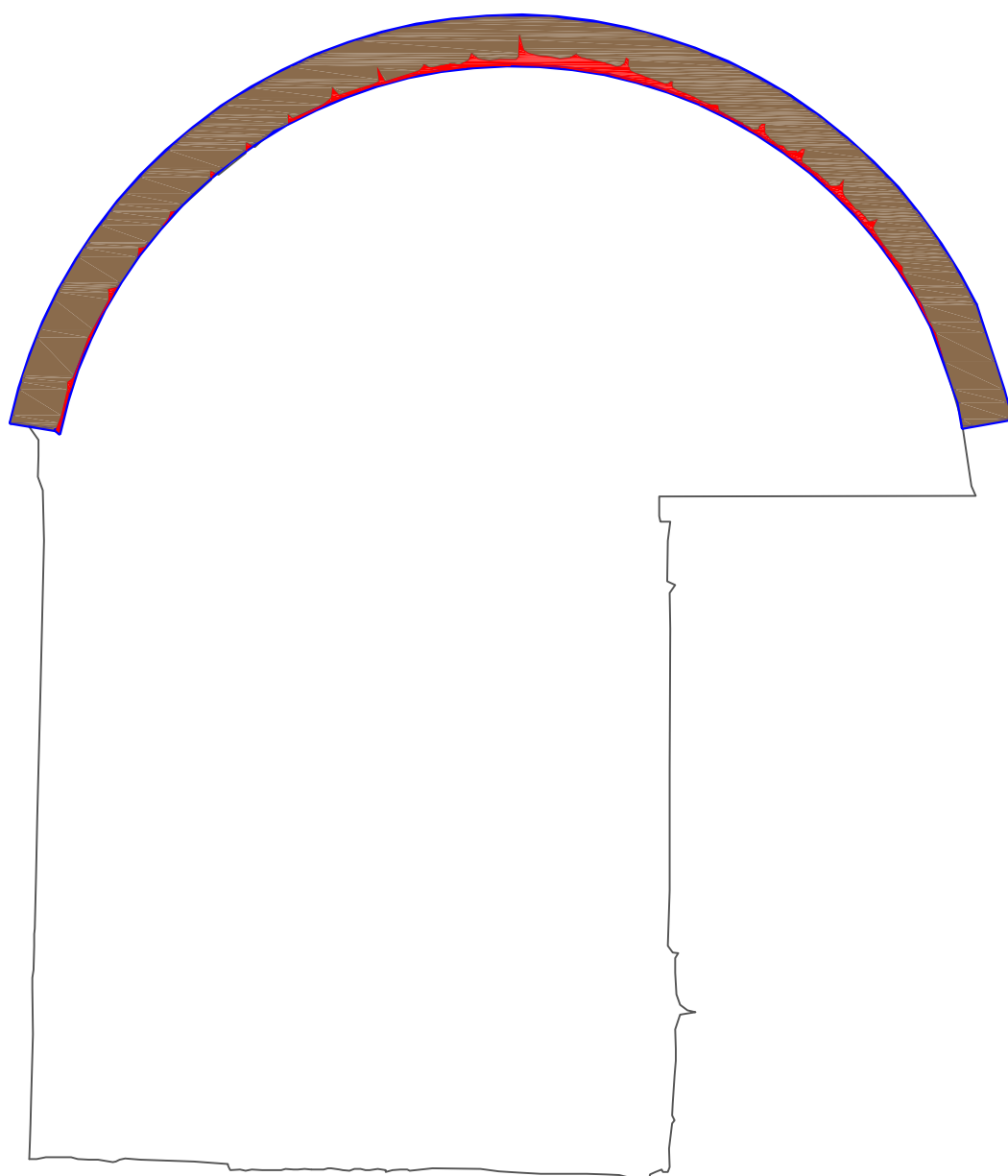
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**03**

Corte nº3

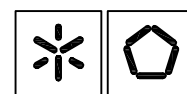


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº3 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

**Data:**

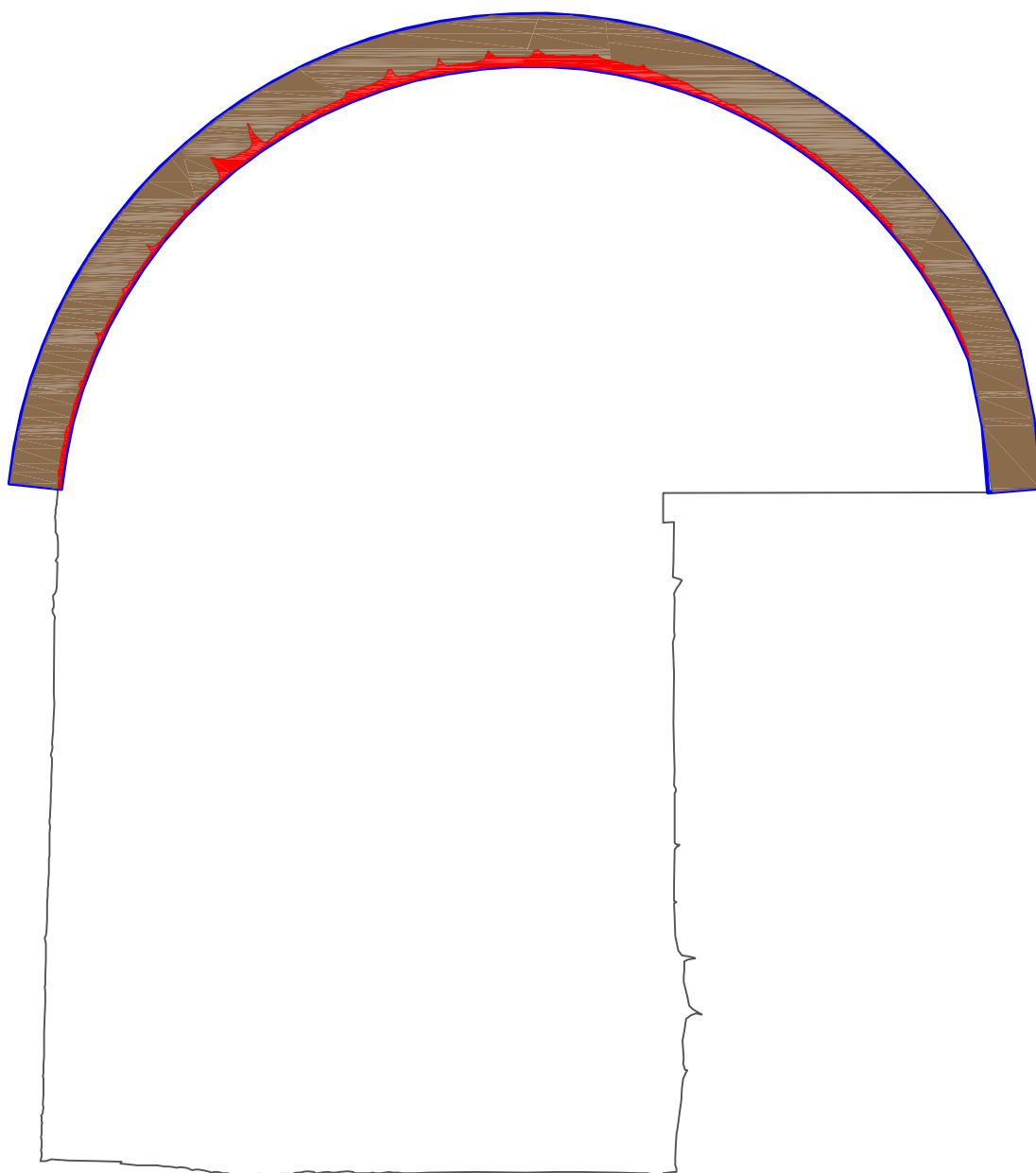
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**04**

Corte nº4



Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº4 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida , Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

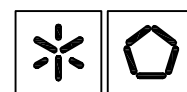
**Escala:**

1/50

**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

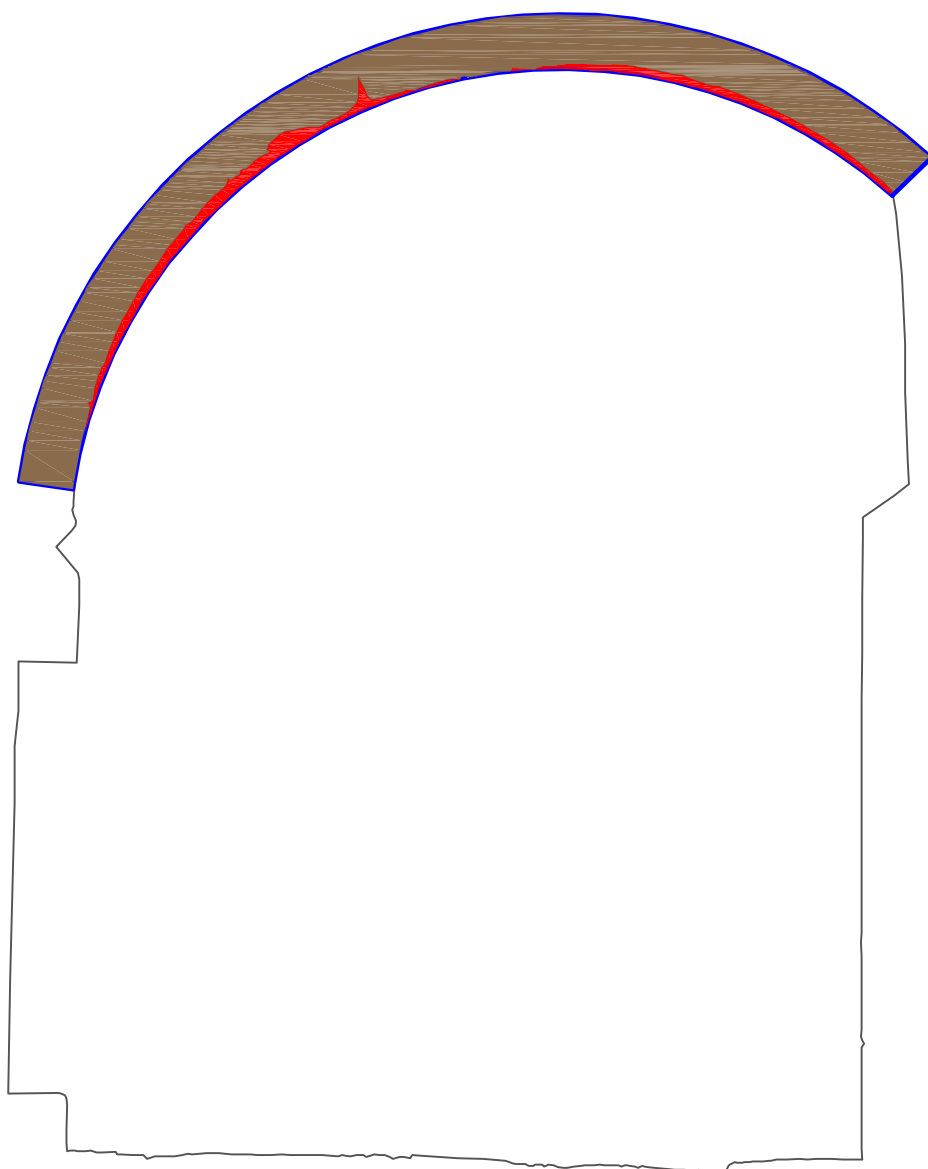


Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Folha:**

**05**

Corte nº5

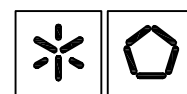


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº5 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

**Data:**

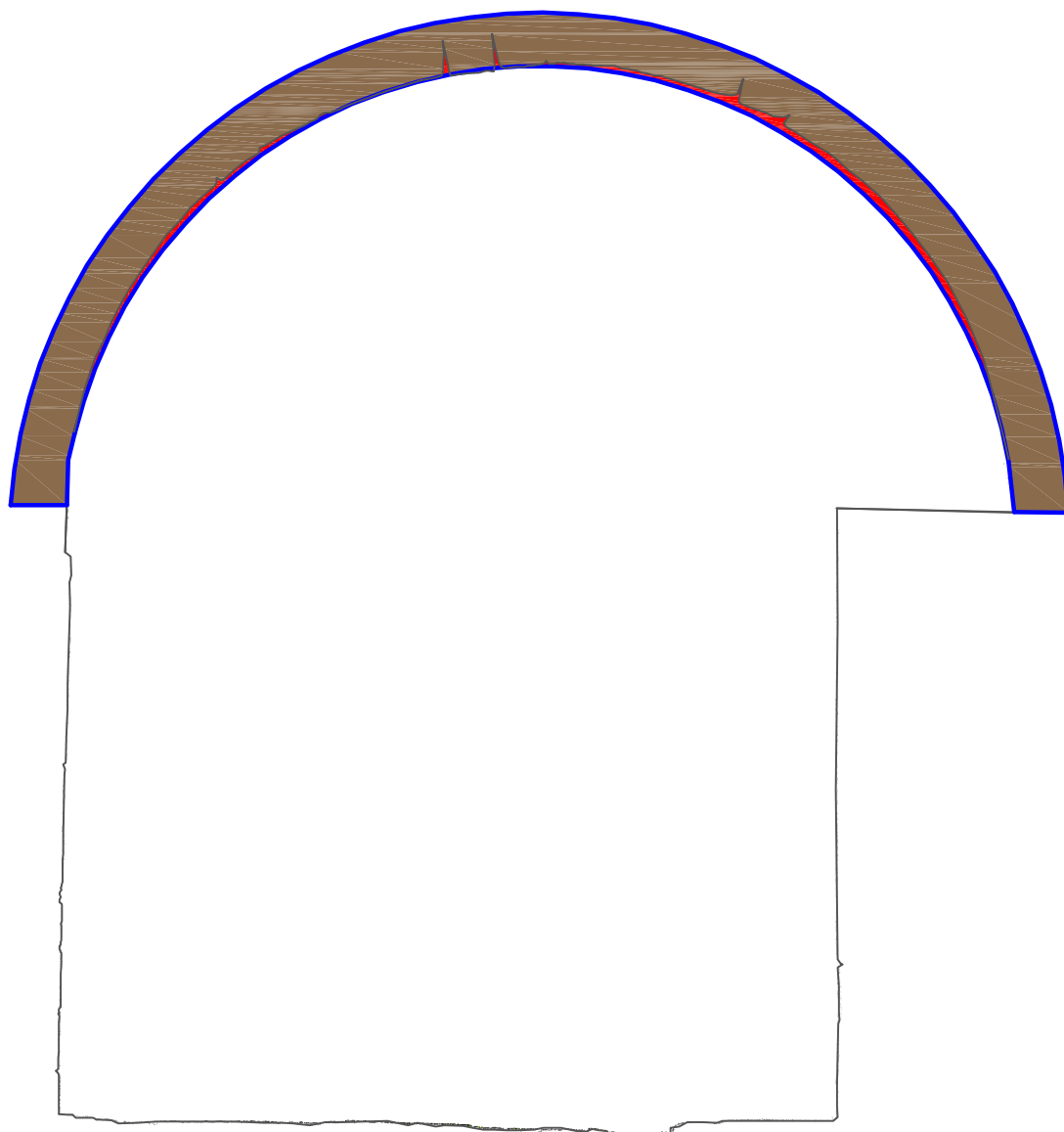
16 Junho 2016

**Rúbricas:**





**Folha:**

**06**

Corte nº6

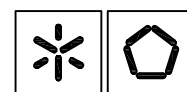


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº6 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

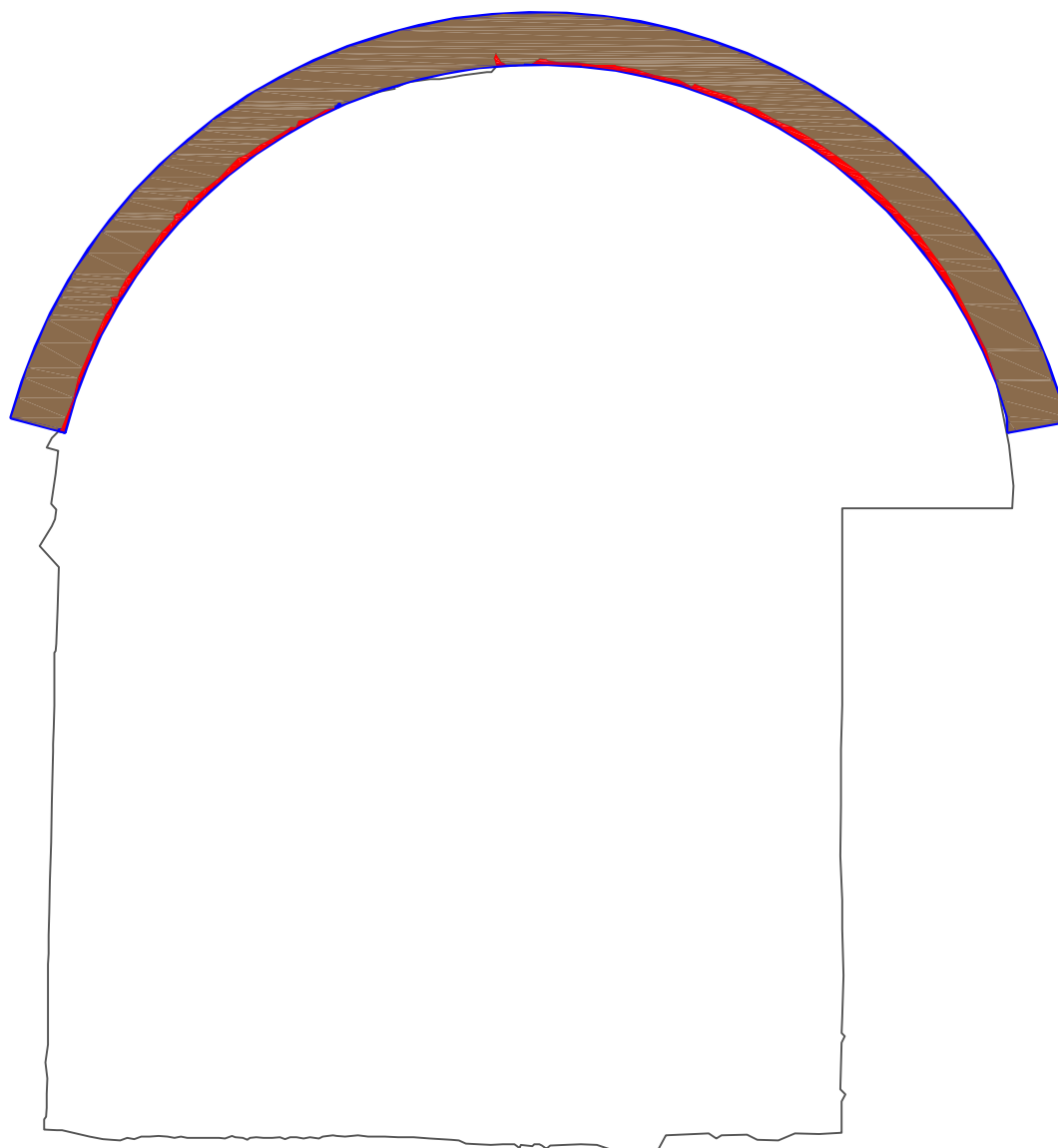
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**07**

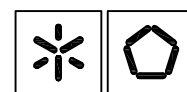


## Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

## Descrição:

Corte nº7 da abóbada, pertencente ao tunél da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

## Edifício:

Porta interior de Santo António.

## Título:

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

## Local:

Almeida, Guarda

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

## Escala:

1/50

## Data:

16 Junho 2016

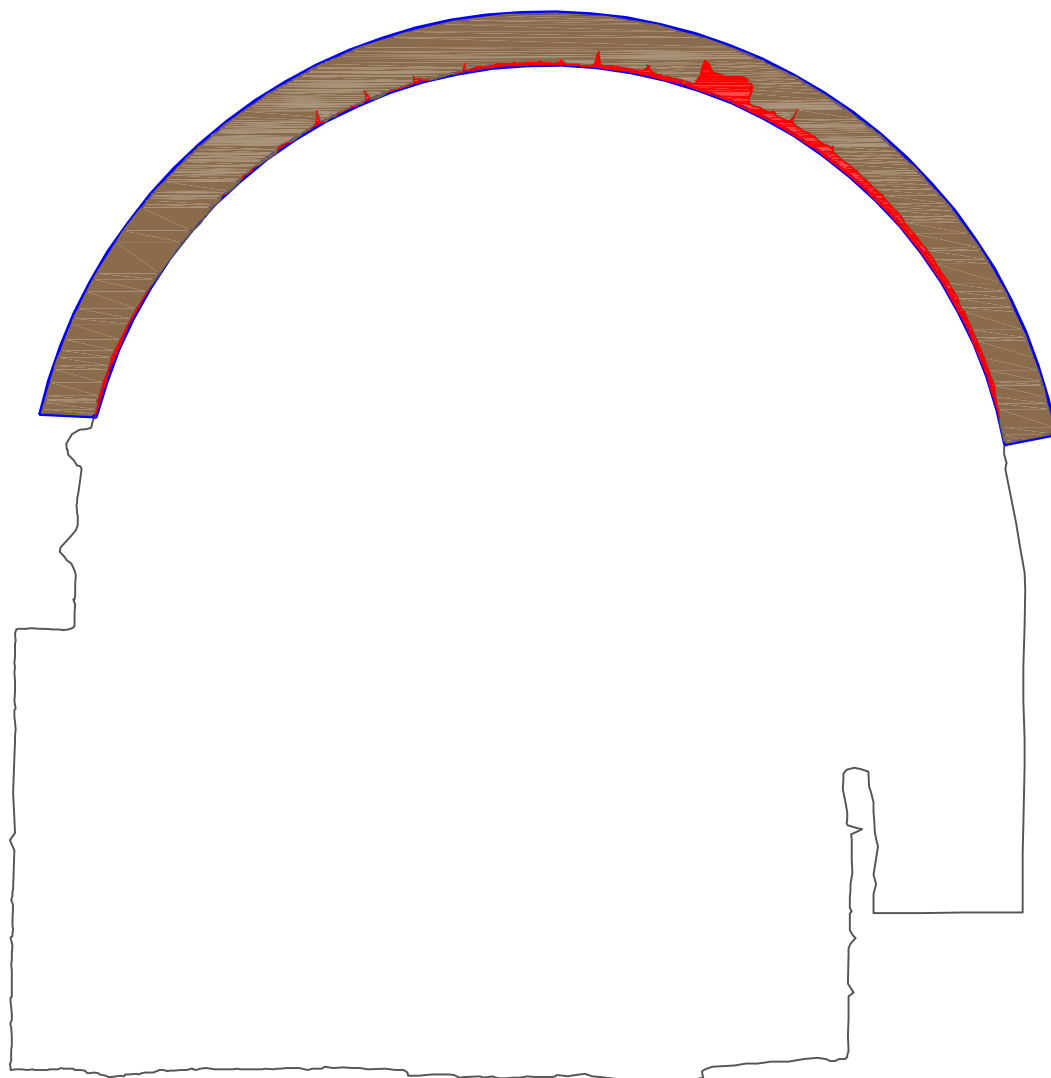
## Rúbricas:

Folha:

08



Corte nº8

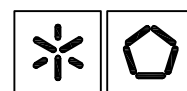


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº8 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

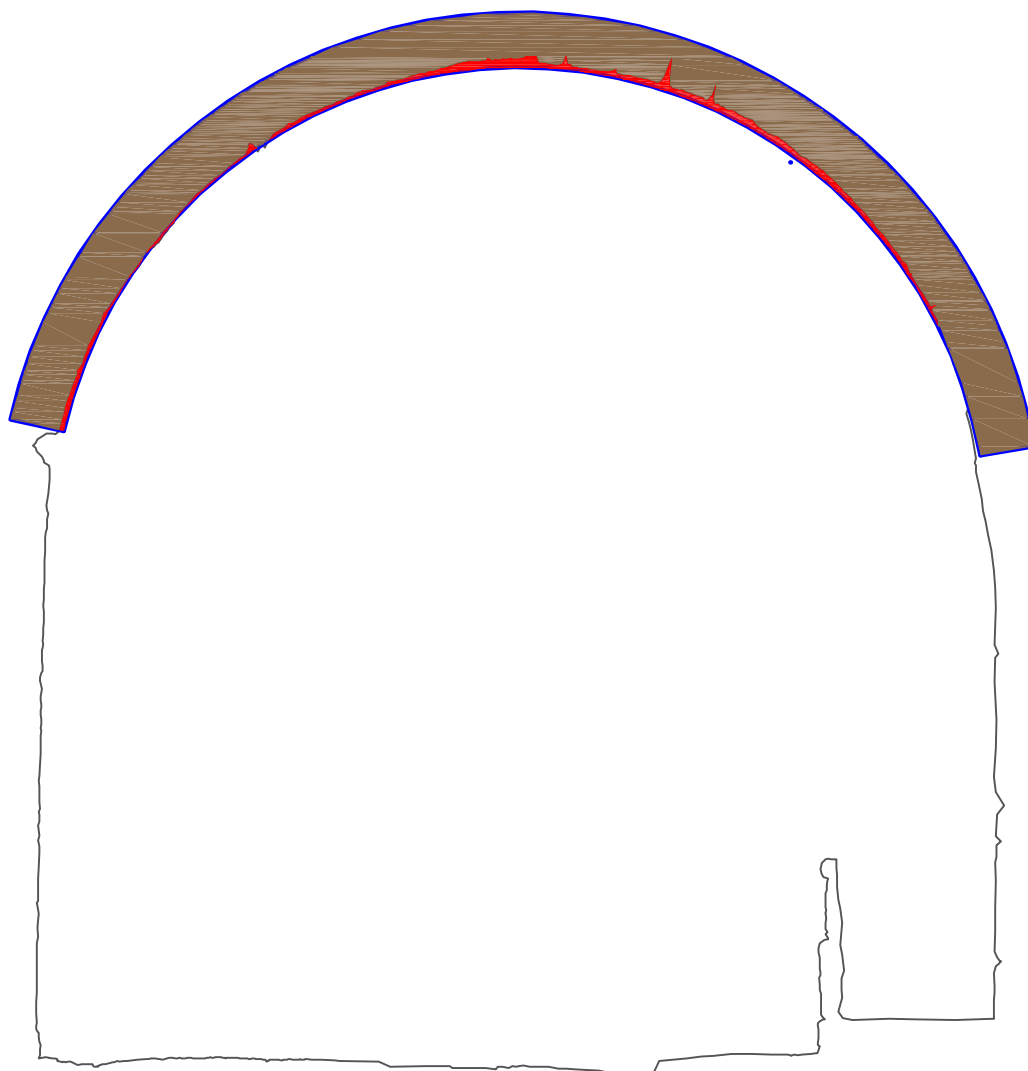
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**09**

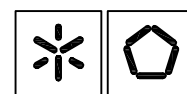


## Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

## Descrição:

Corte nº9 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

## Edifício:

Porta interior de Santo António.

## Título:

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

## Local:

Almeida, Guarda

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

## Escala:

1/50

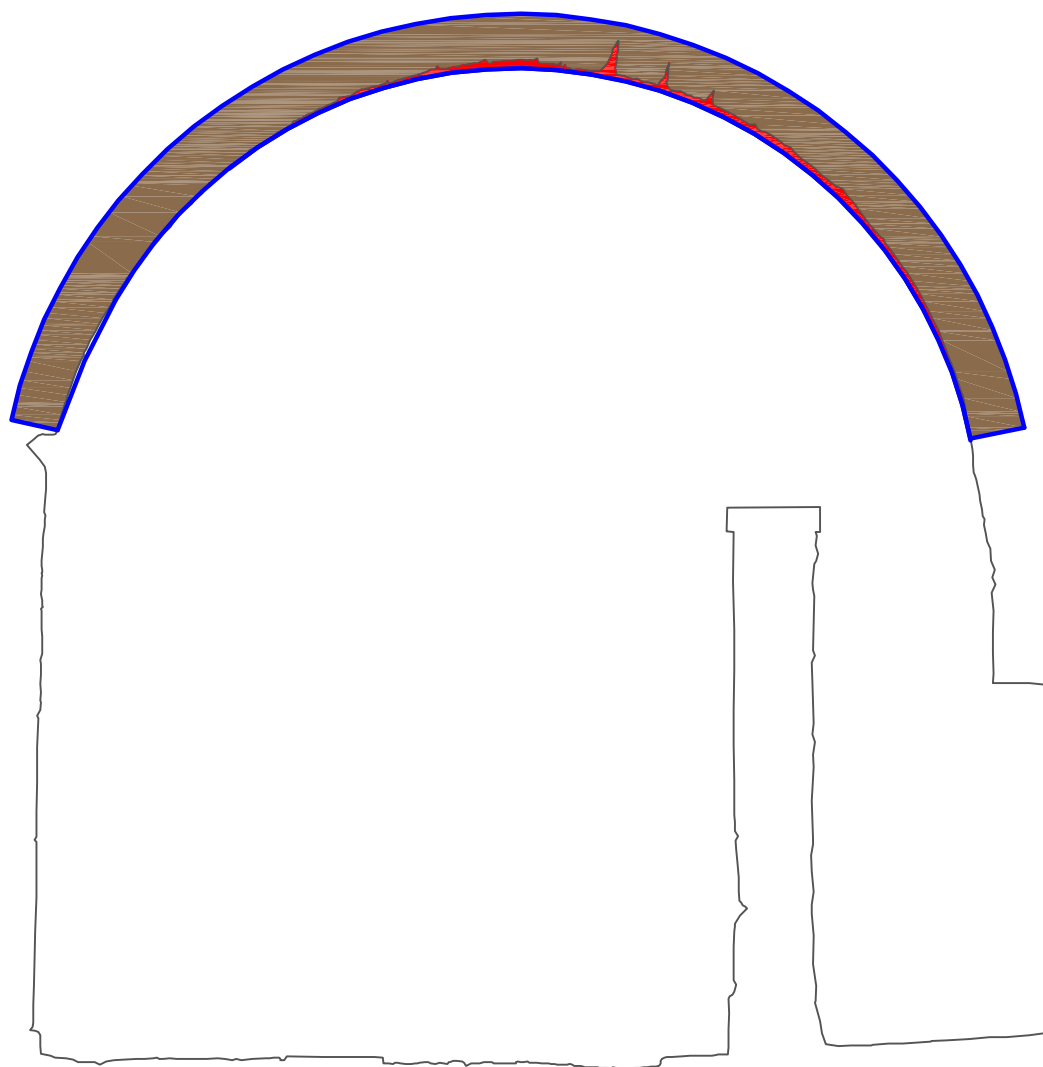
## Data:

16 Junho 2016

## Rúbricas:

## Folha:

10

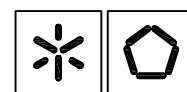


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº10 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

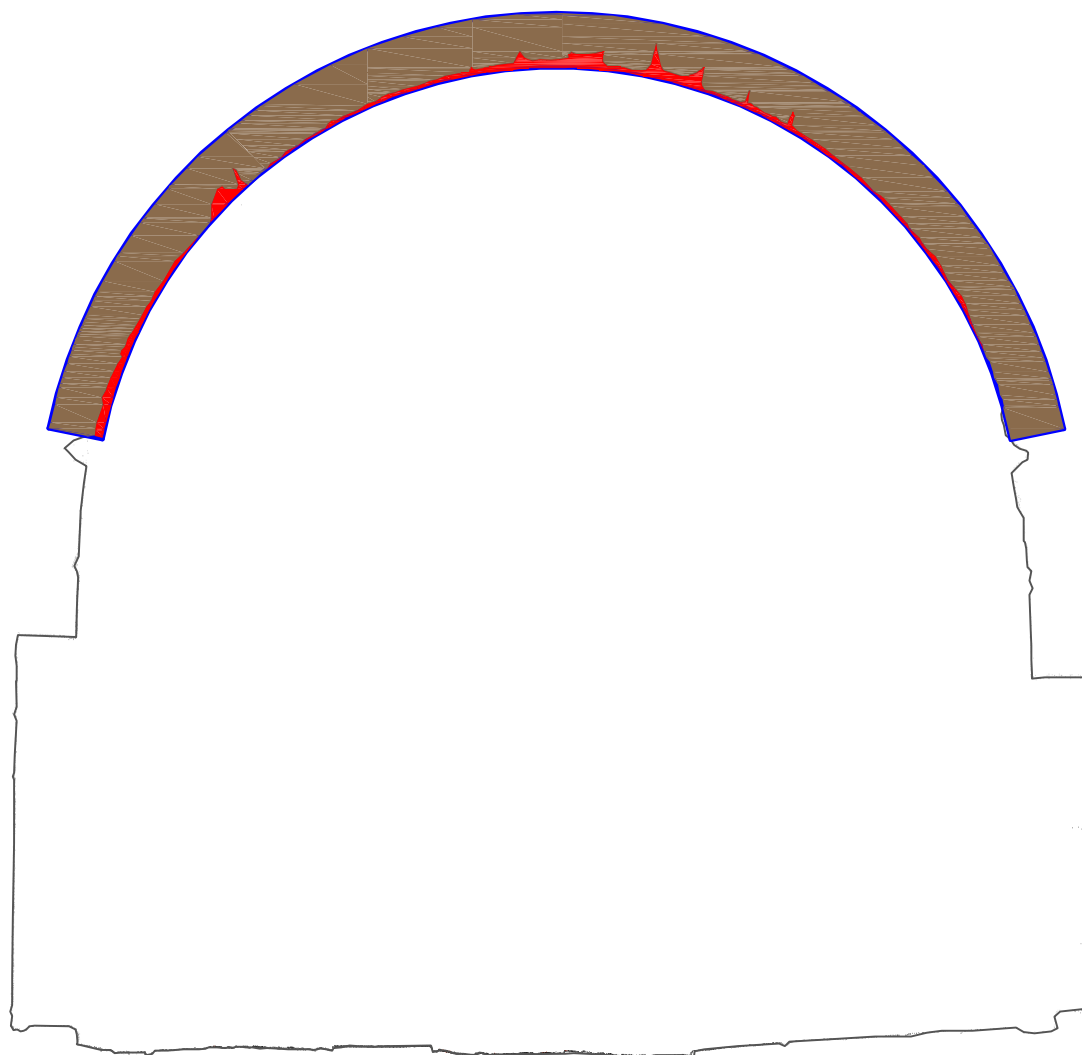
**Data:**

16 Junho 2016





**Rúbricas:**

**Folha:**

**11**

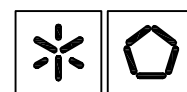


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº11 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

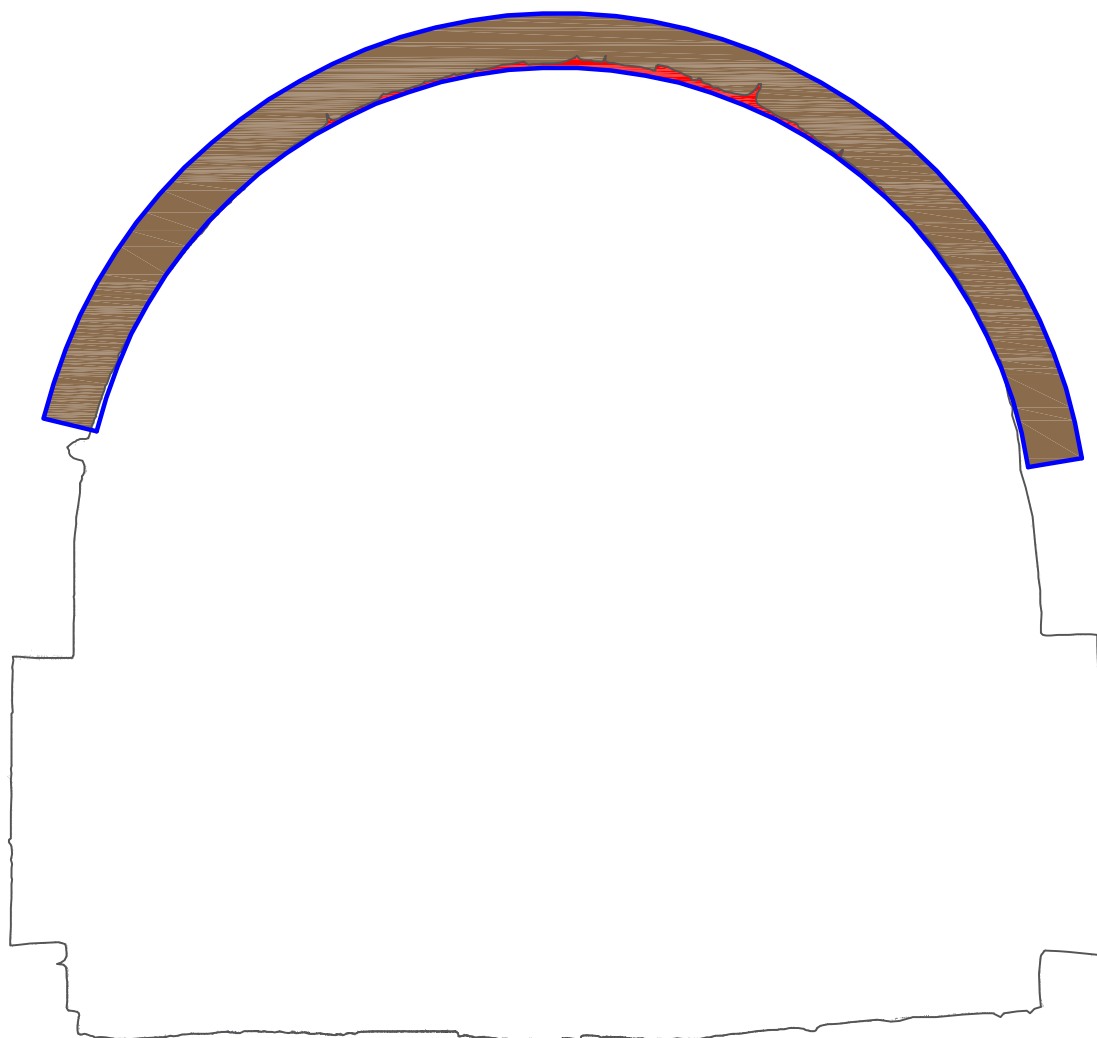
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**12**

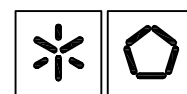


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº12 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

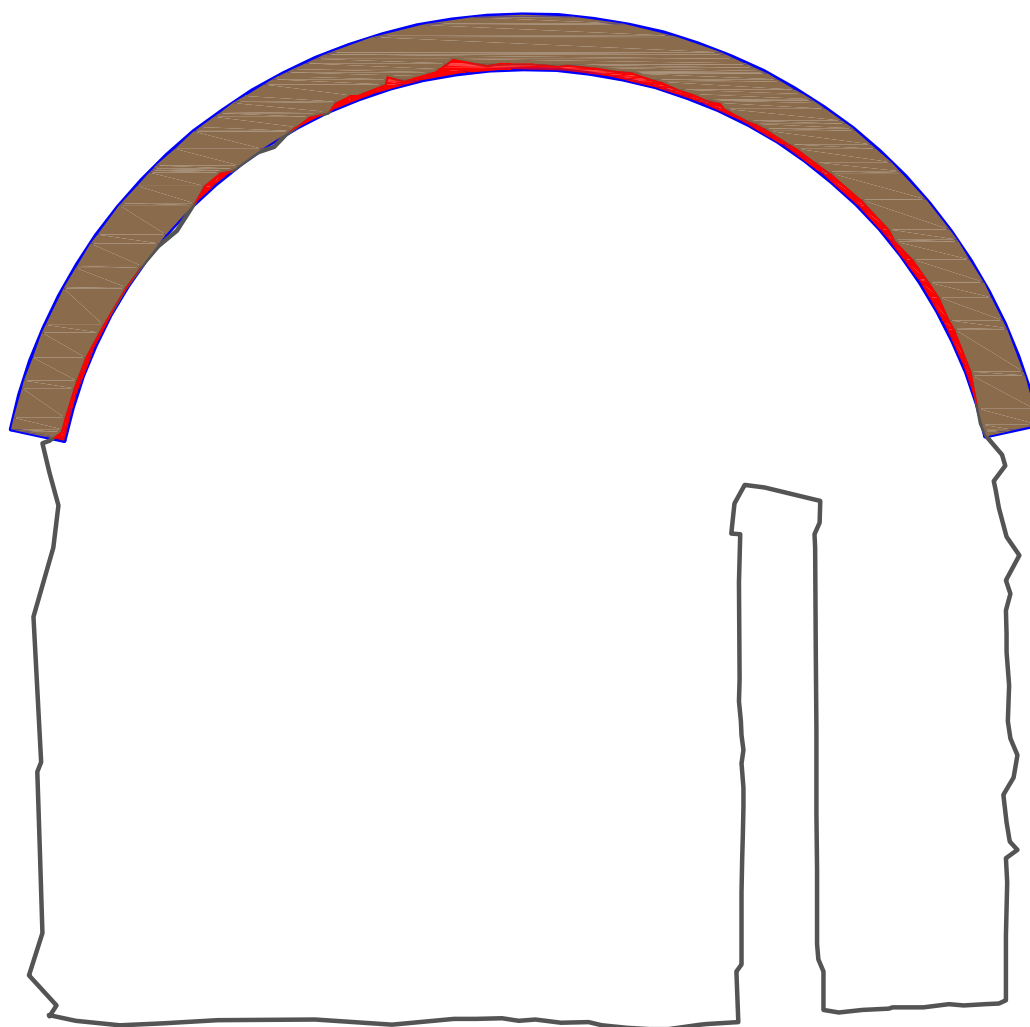
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**13**

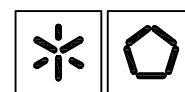


## Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

## Descrição:

Corte nº13 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

## Edifício:

Porta interior de Santo António.

## Título:

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

## Local:

Almeida, Guarda

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

## Escala:

1/50

## Data:

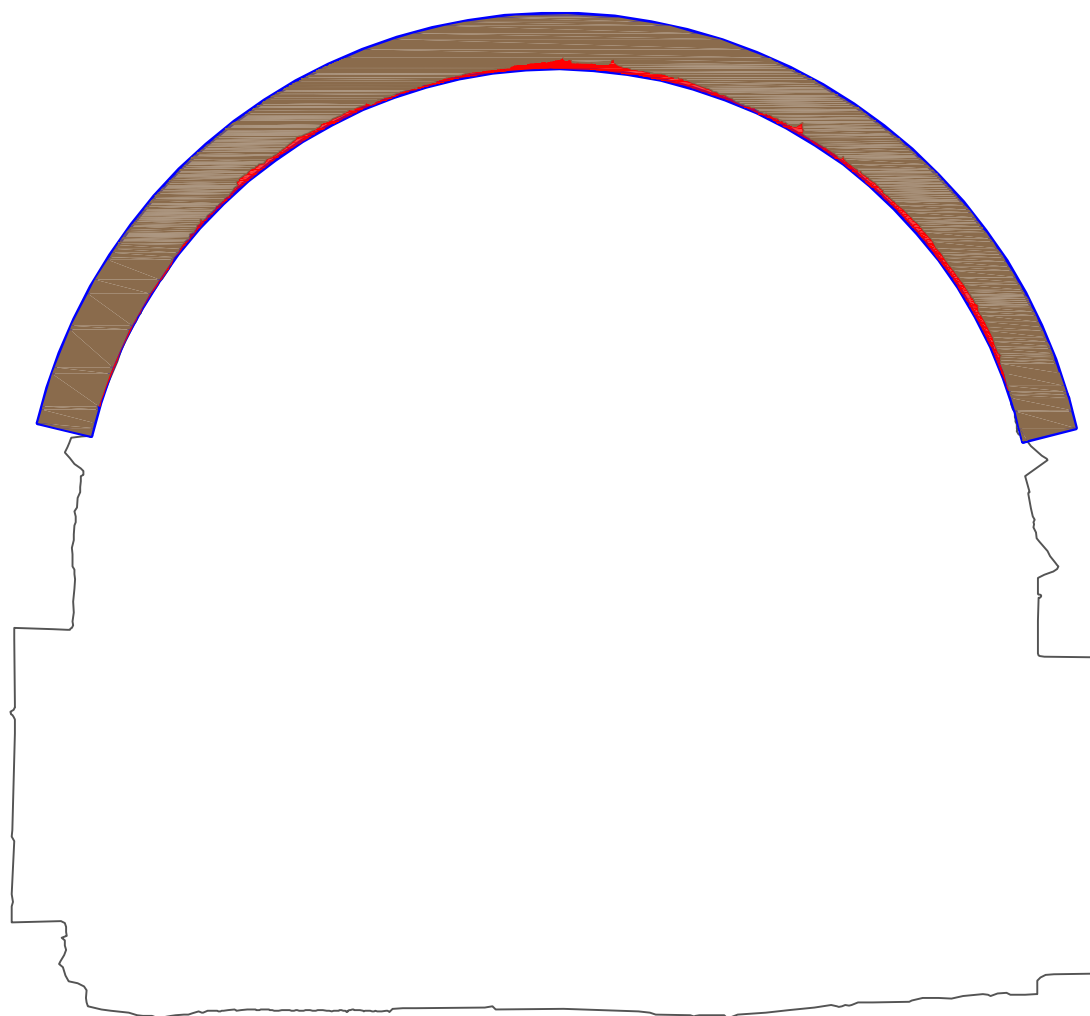
16 Junho 2016

## Rúbricas:

Folha:

14



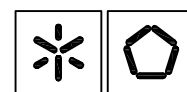


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº14 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

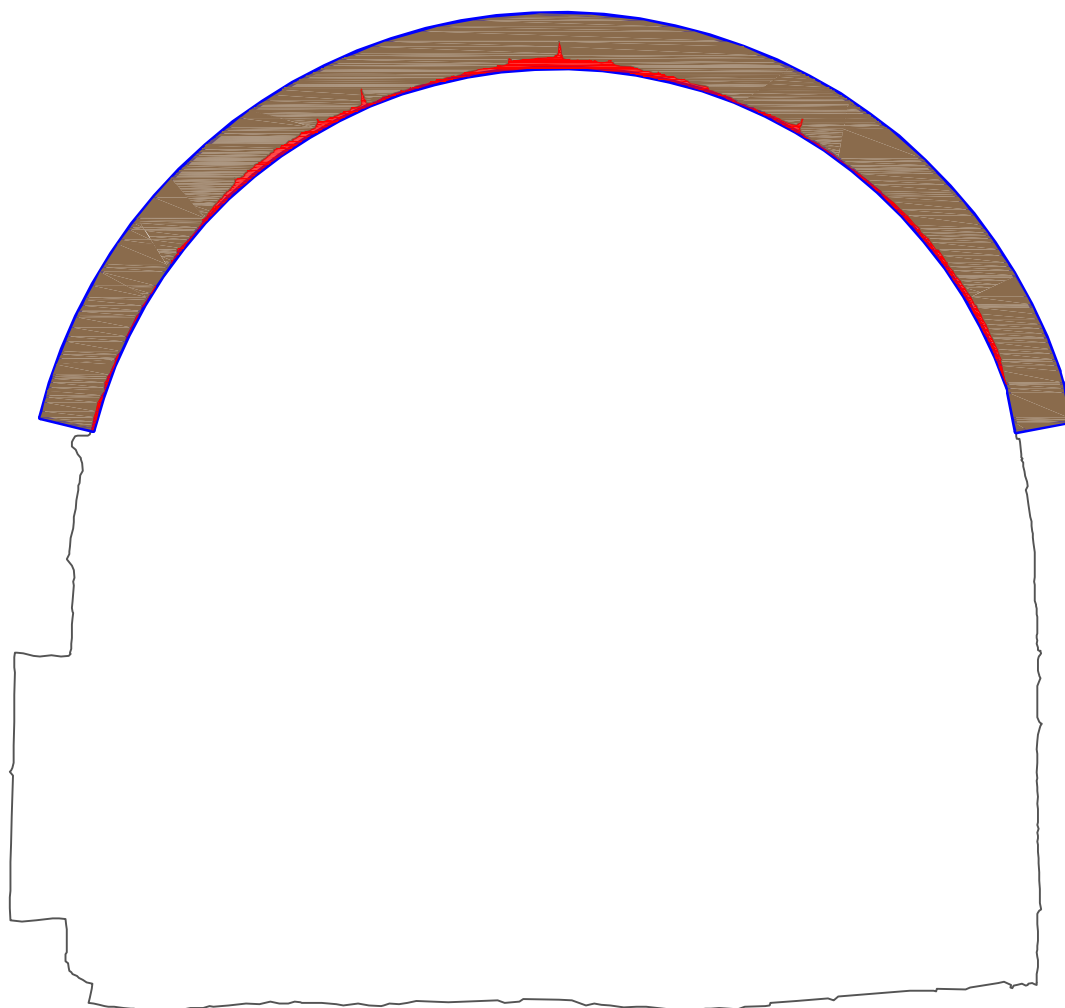
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**15**

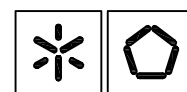


## Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

## Descrição:

Corte nº15 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

## Edifício:

Porta interior de Santo António.

## Título:

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

## Local:

Almeida, Guarda

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

## Escala:

1/50

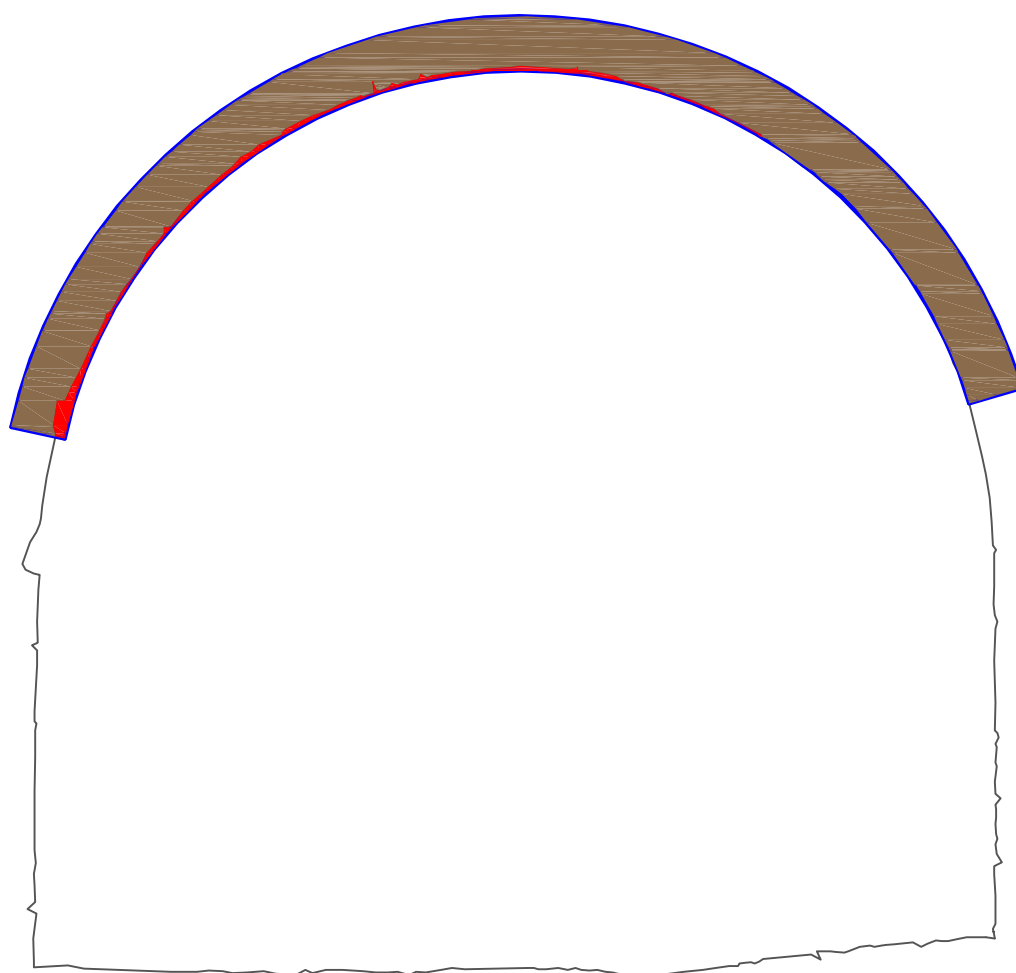
## Data:

16 Junho 2016





## Rúbricas:

Folha:

**16**

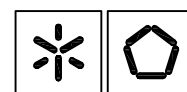


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº16 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

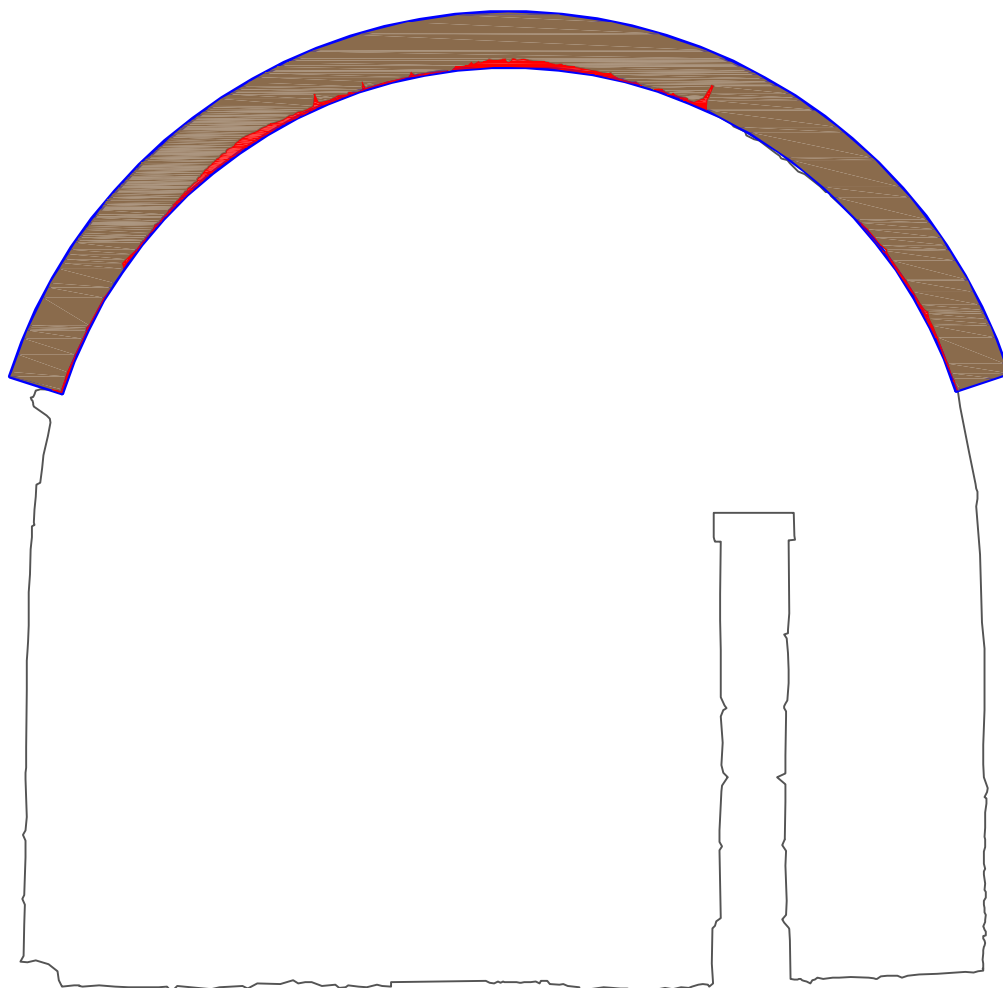
**Data:**

16 Junho 2016





**Rúbricas:**

**Folha:**

**17**

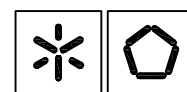


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº17 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

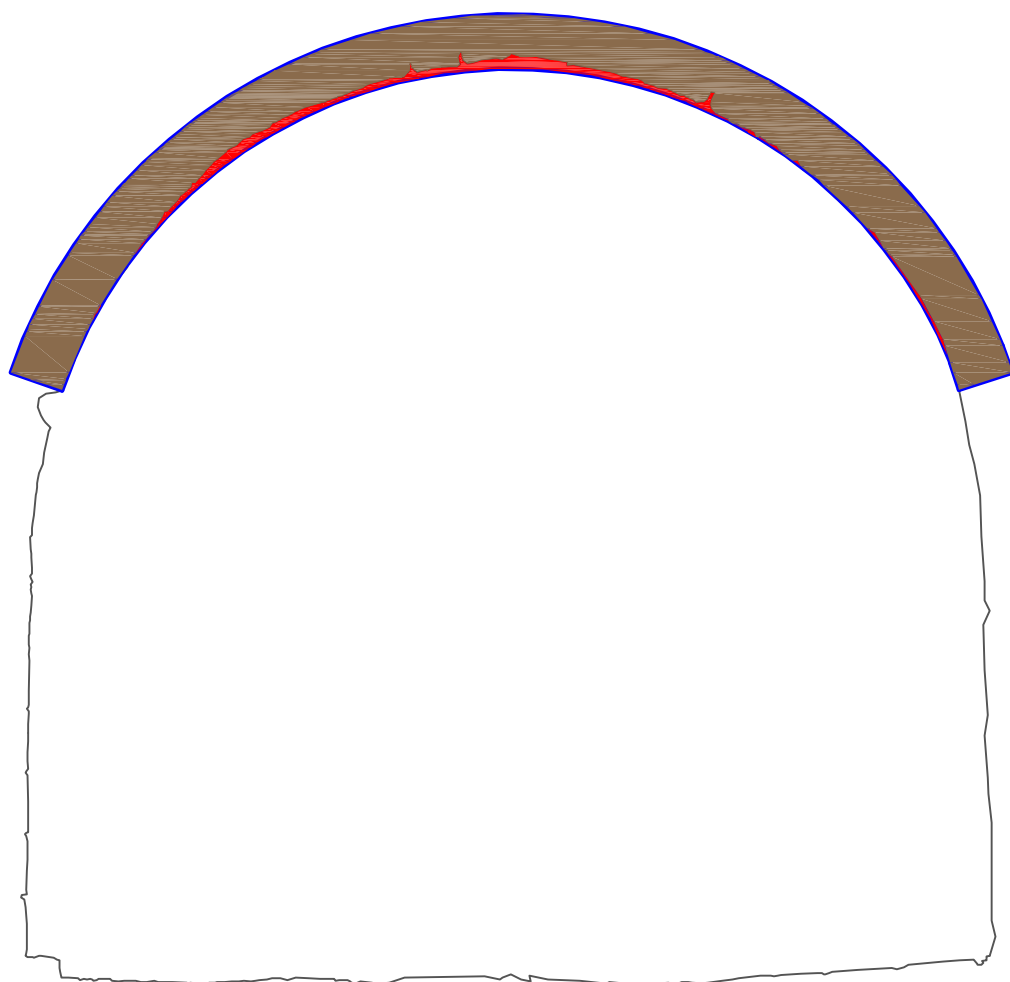
**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**18**

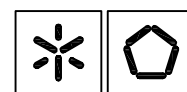


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº18 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

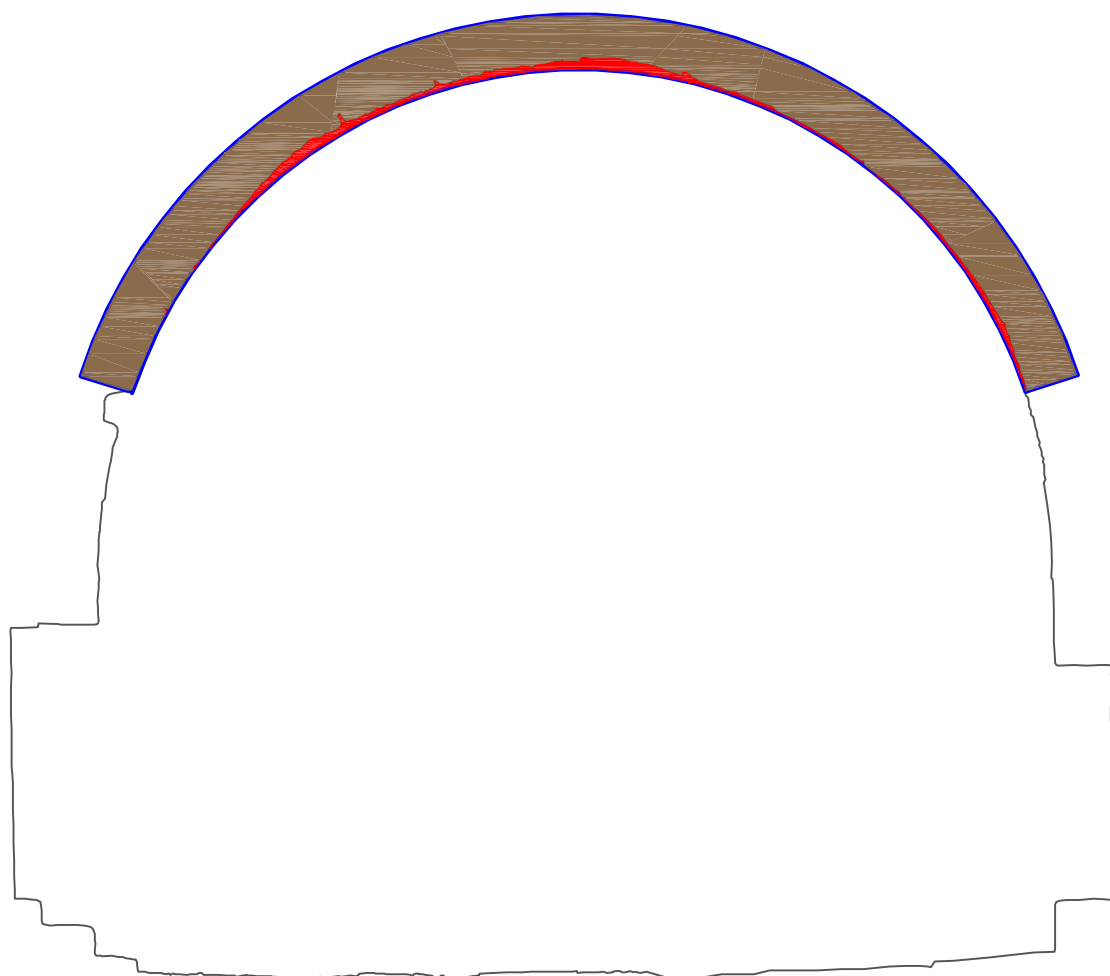
**Data:**

16 Junho 2016





**Rúbricas:**

**Folha:**

**19**

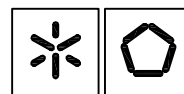


## Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

## Descrição:

Corte nº19 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

## Edifício:

Porta interior de Santo António.

## Título:

Inspecção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

## Local:

Almeida, Guarda

Desenhou: Carlos Barros

Verificou: Luís Ramos

## Escala:

1/50

## Data:

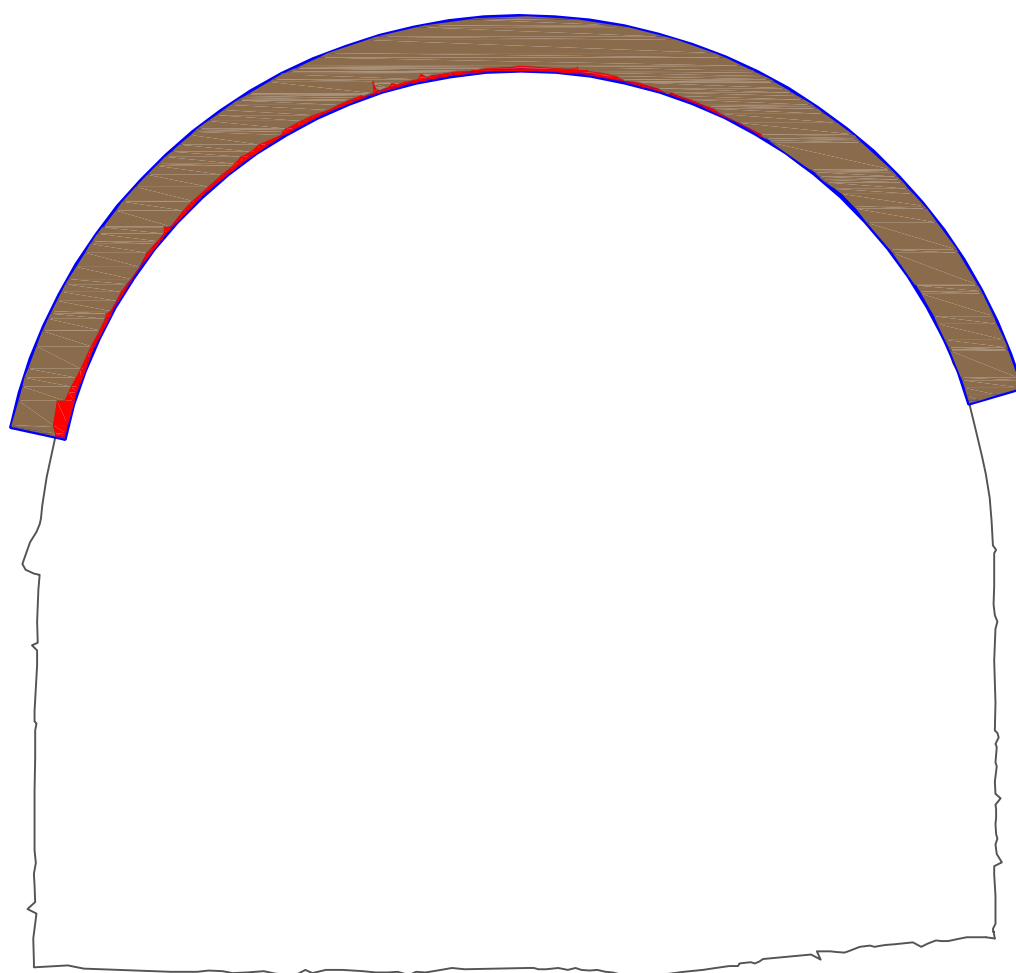
16 Junho 2016

## Rúbricas:

Folha:

20



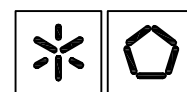


Legenda:

	Área de abóbada resistente existente.
	Área de abóbada resistente perdida.
	Limites de abóbada original.
	Limites de secção fornecidos pelo levantamento laser.

**Descrição:**

Corte nº20 da abóbada, pertencente ao túnel da porta magistral de Santo António.



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém  
4800-058 GUIMARÃES

**Edifício:**

Porta interior de Santo António.

**Título:**

Inspeção e diagnóstico das portas magistrais da Fortaleza de Almeida.

**Local:**

Almeida, Guarda

**Desenhou:** Carlos Barros

**Verificou:** Luís Ramos

**Escala:**

1/50

**Data:**

16 Junho 2016

**Rúbricas:**

**Folha:**

**21**

**Anexo 7- Resultados ultra-sons dos cepos e provetes de granito.**

Tabela 1- Resultados das velocidades de ultra-sons da amostra de pedra amarela.

Direção	Distancia (cm)	Ponto	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	16	Centro	76.90	0.29	76.73	2085.14
			76.90			
			76.40			
		1	74.80	0.70	74.10	2159.24
			74.10			
			73.40			
		2	74.40	0.40	73.97	2163.14
			73.90			
			73.60			
		3	78.40	1.89	79.73	2006.69
			78.90			
			81.90			
		4	74.90	0.58	74.23	2155.37
			73.90			
			73.90			
2	21.5	Centro	164.40	0.00	164.40	1307.79
			164.40			
			164.40			
		1	146.40	2.37	147.87	1454.01
			146.60			
			150.60			
		2	207.00	5.77	203.67	1055.65
			197.00			
			207.00			
		3	243.00	7.81	247.00	870.45
			242.00			
			256.00			
		4	188.10	1.91	190.13	1130.79
			191.90			
			190.40			
3	16	Centro	106.70	0.50	107.20	1492.54
			107.20			
			107.70			
		1	92.90	0.00	92.90	1722.28
			92.90			
			92.90			
		2	84.20	0.12	84.33	1897.23
			84.40			
			84.40			
		3	89.20	0.35	89.23	1793.05
			89.60			
			88.90			
		4	91.20	1.65	92.57	1728.48
			92.10			
			94.40			

Tabela 2- Resultados das velocidades de ultra-sons da amostra de pedra branca.

Direção	Distância (cm)	Ponto	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade
1	16.00	Centro	193.10	0.69	192.70	830.31
			193.10			
			191.90			
		1	184.70	1.40	186.27	858.98
			187.40			
			186.70			
		2	197.70	0.62	198.40	806.45
			198.90			
			198.60			
		3	180.70	0.42	180.57	886.10
			180.90			
			180.10			
		4	214.00	2.08	212.33	753.53
			213.00			
			210.00			
2	13.90	Centro	192.60	1.69	194.47	714.78
			194.90			
			195.90			
		1	196.90	1.25	198.33	700.84
			198.90			
			199.20			
		2	221.00	3.79	223.67	621.46
			222.00			
			228.00			
		3	194.10	2.29	194.60	714.29
			197.10			
			192.60			
		4	228.00	1.00	229.00	606.99
			230.00			
			229.00			
3	21.30	Centro	230.00	0.58	230.33	924.75
			230.00			
			231.00			
		1	235.00	1.53	236.67	900.00
			237.00			
			238.00			
		2	246.00	1.15	247.33	861.19
			248.00			
			248.00			
		3	224.00	1.00	225.00	946.67
			226.00			
			225.00			
		4	230.00	0.00	230.00	926.09
			230.00			
			230.00			

Tabela 3- Resultados das velocidades de ultra-sons dos provetes de pedra amarela sem secagem.

Provete 1						Provete 2						Provete 3					
Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	23.90	0.12	23.97	2086.23	1	5	27.40	0.50	26.90	1858.74	1	5	29.20	0.47	29.73	1681.61
		24.10						26.90						30.10			
		23.90						26.40						29.90			
2	5	29.60	2.18	31.10	1607.72	2	5	22.70	0.25	22.67	2205.88	2	5	21.90	0.25	22.17	2255.64
		30.10						22.40						22.20			
		33.60						22.90						22.40			
3	5	33.10	0.26	32.80	1524.39	3	5	20.60	0.42	21.07	2373.42	3	5	25.40	0.29	25.73	1943.01
		32.60						21.20						25.90			
		32.70						21.40						25.90			

Provete 4						Provete 5						Provete 6					
Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	23.90	0.29	23.73	2106.74	1	5	23.90	0.40	24.33	2054.79	1	5	20.40	0.60	20.47	2443.00
		23.90						24.40						21.10			
		23.40						24.70						19.90			
2	5	24.40	0.30	24.40	2049.18	2	5	21.40	0.25	21.67	2307.69	2	5	25.40	0.00	25.40	1968.50
		24.10						21.90						25.40			
		24.70						21.70						25.40			
3	5	38.10	0.25	38.37	1303.21	3	5	39.10	1.47	37.80	1322.75	3	5	22.40	0.00	22.40	2232.14
		38.40						38.10						22.40			
		38.60						36.20						22.40			

Tabela 4- Resultados das velocidades de ultra-sons dos provetes de pedra branca sem secagem.

Provet 1						Provet 2						Provet 3					
Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	36.1	0.5	35.6	1404.49	1	5	37.5	0.40	37.26	1341.68	1	5	55.5	0.65	55.6	899.28
		35.1						37.5						55			
		35.6						36.8						56.3			
2	5	57.1	1.56	58.33	857.14	2	5	55.1	0.55	55.73	897.12	2	5	39.3	0.51	38.73	1290.87
		57.8						56.1						38.6			
		60.1						56						38.3			
3	5	35.6	0.47	36.13	1383.76	3	5	31.5	0.40	31.93	1565.76	3	5	36	0.28	36.16	1382.48
		36.5						32						36.5			
		36.3						32.3						36			

Provet 4						Provet 5						Provet 6					
Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	50.3	0.40	50.66	986.84	1	5	55.6	3.21	53.26	938.67	1	5	35.9	0.40	35.53	1407.12
		51.1						54.6						35.6			
		50.6						49.6						35.1			
2	5	33	0.45	33.5	1492.53	2	5	38.3	0.49	38.86	1286.44	2	5	54.7	1.28	55.76	896.59
		33.6						39.1						55.4			
		33.9						39.2						57.2			
3	5	31.3	0.25	31.56	1583.94	3	5	39.5	0.36	39.1	1278.77	3	5	32.4	0.86	33.4	1497.00
		31.8						39						33.9			
		31.6						38.8						33.9			



Tabela 5- Resultados das velocidades de ultra-sons dos provetes de pedra amarela após estufa (massa constante).

Provete 1						Provete 2						Provete 3					
Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	25.1	0.12	24.96	2002.67	1	5	44.2	0.26	44.5	1123.59	1	5	23.9	0.11	23.96	2086.23
		24.9						44.6						23.9			
		24.9						44.7						24.1			
2	5	27.2	0.17	27	1851.85	2	5	26.9	0.2	26.7	1872.65	2	5	30.9	0.51	30.46	1641.13
		26.9						26.5						30.6			
		26.9						26.7						29.9			
3	5	22.5	0.1	22.5	2222.22	3	5	28.7	0.41	28.23	1770.95	3	5	26.2	0.37	26.46	1889.16
		22.6						28.1						26.3			
		22.4						27.9						26.9			

Provete 4						Provete 5						Provete 6					
Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distância (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	20.2	0	20.2	2475.24	1	5	29.7	0.2	29.9	1672.24	1	5	24.6	0.2	24.8	2016.12
		20.2						30.1						25			
		20.2						29.9						24.8			
2	5	29.2	0.20	29.43	1698.75	2	5	24.2	0.25	24.43	2046.38	2	5	23.4	0.15	23.53	2124.64
		29.5						24.7						23.7			
		29.6						24.4						23.5			
3	5	25.1	0.15	24.93	2005.34	3	5	38.4	0.15	38.56	1296.45	3	5	32.7	0.11	32.76	1525.94
		24.9						38.7						32.9			
		24.8						38.6						32.7			

Tabela 6- Resultados das velocidades de ultra-sons dos provetes de pedra branca após estufa (massa constante).

Provete 1						Provete 2						Provete 3					
Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	42.10	0.15	42.27	1182.97	1	5	43.10	0.46	43.50	1149.43	1	5	63.20	0.15	63.37	789.06
		42.30						43.40						63.40			
		42.40						44.00						63.50			
2	5	36.80	0.15	36.67	1363.64	2	5	62.30	0.40	62.73	797.02	2	5	44.10	0.20	44.30	1128.67
		36.70						63.10						44.50			
		36.50						62.80						44.30			
3	5	68.80	0.26	68.60	728.86	3	5	40.00	0.25	40.03	1248.96	3	5	39.30	0.20	39.50	1265.82
		68.70						40.30						39.50			
		68.30						39.80						39.70			

Provete 4						Provete 5						Provete 6					
Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)	Direção	Distancia (cm)	$\mu$	Desvio	Média $\mu$	Velocidade (m/s)
1	5	63.10	0.21	63.17	791.56	1	5	64.30	0.20	64.30	777.60	1	5	39.10	0.30	39.40	1269.04
		63.40						64.50						39.70			
		63.00						64.10						39.40			
2	5	38.70	0.21	38.47	1299.83	2	5	41.90	0.15	41.87	1194.27	2	5	66.80	0.32	66.43	752.63
		38.30						41.70						66.20			
		38.40						42.00						66.30			
3	5	37.50	0.06	37.53	1332.15	3	5	40.50	0.21	40.43	1236.60	3	5	36.40	0.25	36.37	1374.89
		37.60						40.20						36.60			
		37.50						40.60						36.10			

## **Anexo 8- Ficha técnica do granito Amarelo Figueira**



Conteúdo	Catálogo Sequencial
Tipos de Rochas	Geo-Referenciação
Motor de Busca	Simulações



Imagem em tamanho real.

### ► Enquadramento Geológico

Trata-se de uma extensa mancha de granito de tendência alcalina aflorante a norte de Figueira de Castelo Rodrigo e que se estende até Armamar (Beira Alta). A intrusão ter-se-á verificado durante as últimas fases da orogenia Hercínica.

### ► Características Físico-Mecânicas

1. Resistência mecânica à compressão 1830 kg/cm<sup>2</sup>
  2. Res. mec. à compr. após teste de gelividade 1650 kg/cm<sup>2</sup>
  3. Resistência mecânica à flexão 112 kg/cm<sup>2</sup>
  4. Massa volúmica aparente 2610 kg/m<sup>3</sup>
  5. Absorção de água à P. At.N. 0.6 %
  6. Porosidade aberta 1.5 %
  7. Coef. de dilatação linear térmica val. máx 7.5 x 10<sup>-6</sup> per° C
  8. Resistência ao desgaste 0.3 mm
  9. Resistência ao choque: altura mínima de queda 70 cm
- Obs.** A resistência ao gelo é superior a 48 ciclos de gelo-degelo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS ACTUALIZADAS NO ÂMBITO DO PA1 DO CLUSTER DA PEDRA NATURAL (COMPETE / QREN / UNIÃO EUROPEIA)

### ► Microscopia

#### Minerais Essenciais

Microclina	~36 %
Plagioclase	~33 %
Quartzo	~23 %

#### Minerais acessórios

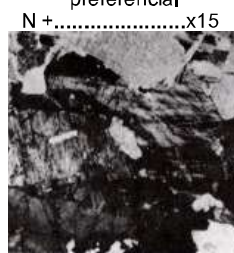
Biotite + moscovite ~7%  
Apatite, zircão e minerais opacos ~1%

#### Descrição Microscópica

Granito de duas micas com textura hipidiomórfica

#### Aspectos Microscópicos

Segundo o plano de orientação preferencial



Segundo o contra  
N + .....x15

### ► Análise Química

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.55 %
CaO	0.63 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (total)	2.38 %
H <sub>2</sub> O+	0.69 %
H <sub>2</sub> O-	0.25 %
K <sub>2</sub> O	5.46 %
MgO	0.46 %
MnO - vest.	%
Na <sub>2</sub> O	3.33 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07 %
SiO <sub>2</sub>	71.03 %
TiO <sub>2</sub>	0.23 %

RI-GR 104

### ► Localização

Distrito - GUARDA  
Concelho - FIGUEIRA DE CASTELO RODRIGO  
Freguesia - VILAR DE AMARGO E OUTRAS (AND OTHERS)  
Lugar - Q.ta DO MATA DIABOS / FREIXEDA DO TORRÃO

### ► Descrição Macroscópica

Granito de cor branca-amarelada a amarela-acastanhada, homogénea, de grão médio, com raros megacristais de feldspato.

### ► Utilização Recomendada

Todos os tipos de trabalhos em pedra maciça. Sob a forma de placas, em interiores ou zonas exteriores abrigadas.

### ► Características Gerais da Exploração

As explorações da área aproveitam grandes "bolas" graníticas ocorrentes à superfície do maciço, extraído-se, também, uma variedade de tom esbranquiçado, mais compacta e mais resistente que os tipos amarelados. A rocha apresenta-se ligeiramente foliada. A alteração do tom da rocha para amarelado ou avermelhado faz-se a partir das diaclases. Estas dispõem-se em 3 sistemas quase ortogonais, dos quais um é sub-horizontal e o mais relevante tem atitude média N 85° W, com pendor elevado a vertical. O outro sistema acessório é, também, subvertical, com direcção N 10° a 15° E. Por vezes, há rubenização do granito em orlas concéntricas e raros enclaves de rocha mais grosseira ou de biotite, "schlierens" biotíticos e zonas aplíticas. É possível a obtenção de grandes blocos, sendo as placas para polimento serradas ao "contra". Também é comum a comercialização das variedades branca e amarelada com aspecto rústico ou amaciado. As reservas da área são muito elevadas, nomeadamente no que se refere às variedades mais claras.

granular, ligeiramente  
alterado e microfraturado.



◀ FICHA  
ANTERIOR

Ver Fornecedores

Ver Caso - Tipo

Inserir Caso - Tipo

FICHA ▶▶  
SEGUINTE

## **Anexo 9- Ficha técnica do granito Cinza Pinhel**



Conteúdo	Catálogo Sequencial
Tipos de Rochas	Geo-Referenciação
Motor de Busca	Simulações



Imagem em tamanho real.

### ► Enquadramento Geológico

As manchas deste tipo de granito encontram-se inseridas num maciço com orientação aproximada E-W, aflorante a Norte de Pinhel (Beira Alta). Trata-se de intrusões graníticas do final do Carbónico.

### ► Características Físico-Mecânicas

1. Resistência mecânica à compressão 2110 kg/cm<sup>2</sup>
  2. Res. mec. à compr. após teste de gelividade 1900 kg/cm<sup>2</sup>
  3. Resistência mecânica à flexão 157 kg/cm<sup>2</sup>
  4. Massa volúmica aparente 2630 kg/m<sup>3</sup>
  5. Absorção de água à P. At.N. 0.3 %
  6. Porosidade aberta 0.7 %
  7. Coef. de dilatação linear térmica val. máx 8.0 x 10<sup>-6</sup> per° C
  8. Resistência ao desgaste 0.2 mm
  9. Resistência ao choque: altura mínima de queda 65 cm
- Obs.** A resistência ao gelo é superior a 48 ciclos de gelo-degelo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS ACTUALIZADAS NO ÂMBITO DO PA1 DO CLUSTER DA PEDRA NATURAL (COMPETE / QREN / UNIÃO EUROPEIA)

### ► Microscopia

#### Minerais Essenciais

Microclina	~55 %
Quartzo	~20 %
Plagioclase	~15 %
Biotite+moscovite	~10 %

#### Minerais acessórios

Zircão, apatite e minerais opacos ~1%

#### Descrição Microscópica

Rocha granítica com textura hipidiomórfica granular.

#### Aspectos Microscópicos

Segundo o plano de orientação preferencial



Segundo o contra N +.....x15

### ► Análise Química

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.74 %
CaO	1.40 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (total)	2.62 %
H <sub>2</sub> O+	0.58 %
H <sub>2</sub> O-	0.13 %
K <sub>2</sub> O	5.87 %
MgO	0.48 %
MnO	0.05 %
Na <sub>2</sub> O	3.48 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06 %
SiO <sub>2</sub>	70.86 %
TiO <sub>2</sub>	0.35 %

GRANITO	CINZENTO DE PINHEL	ROCHAS ÍGNEAS
---------	--------------------	---------------

RI-GR 105

### ► Localização

Distrito - GUARDA  
Concelho - PINHEL  
Freguesia - FREIXEDAS / MANIGOTO / VASCOVEIRO  
Lugar - LADEIRA / MANIGOTO / ESCORREGADIO

### ► Descrição Macroscópica

Rocha de cor cinzenta e de duas micas, com biotite predominante, granulado médio e alguns megacristais de feldspato.

### ► Utilização Recomendada

Cantarias, revestimentos e obras decorativas, tanto para interiores como para exteriores.

### ► Características Gerais da Exploração

A rocha granítica explorada apresenta-se em "bolas" de grande tamanho, ocorrentes à superfície do maciço. Além da variedade cinzenta-azulada, que é a mais comum, ocorrem os tipos de granito cinzento-claro e amarelado, com características físicas ligeiramente diferentes. A fracturação é relativamente escassa e dispersa, sendo de realçar fracturas de pendor elevado ou verticais E-W e N 50 a 70° E e as pertencentes a um sistema sub-horizontal de atitude média N 85° W, 30° N. A rocha apresenta, por vezes, cristais de feldspato dispersos bem desenvolvidos e enclaves biotíticos de tamanho variável. Por alteração, apresenta tonalidade amarelada junto de algumas das diaclases. É possível a obtenção de grandes blocos. É comum a sua serragem segundo o "levante" ou ao "correr" da pedra e os acabamentos mais habituais são o cinzelado e o amaciado. Para polimento, utilizam-se, de preferência, placas cortadas segundo o "levante". As reservas deste tipo de granito são elevadas.





◀ FICHA  
ANTERIOR

Ver Fornecedores

Ver Caso - Tipo

Inserir Caso - Tipo

FICHA ▶▶  
SEGUINTE